

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Механіко-машинобудівний інститут

Кафедра «Інтегровані технології машинобудування»

«На правах рукопису»
УДК 621.923

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри
_____ О. А. Охріменко
(підпис)

“ ____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 131 прикладне машинобудування
(код і назва)

на тему: Дослідження силових характеристик взаємодії інструменту з деталлю при магнітно-абразивному обробленні у кільцевій ванні

Виконав: студент __6__ курсу, групи МІ-81мп
(шифр групи)

Заставський Костянтин Олегович
(прізвище, ім'я, по батькові) _____ (підпис)

Науковий керівник д. т. н. Майборода Віктор Станіславович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) _____ (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) _____ (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет) Механіко-машинобудівний

Кафедра «Інтегровані технології машинобудування»

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 131 – прикладне машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ О. А. Охріменко
(підпис)

«___» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Заставському Костянтину Олеговичу
(прізвище, ім'я, по батькові)**

1. Тема дисертації «Дослідження силових характеристик взаємодії інструменту з деталлю при магнітно-абразивному обробленні у кільцевій ванні»

науковий керівник дисертації д.т.н., професор Майборода Віктор Станіславович _____ ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження Силові характеристики взаємодії оброблюваної деталі з МАІ при магнітно-абразивному обробленні.

4. Предмет дослідження Процес МАО

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1. Проаналізувати особливості процесу МАО та існуючих фінішних методів оброблення різального інструменту;

2. Розробити методики для дослідження силової взаємодії при МАО;

3. Виконати дослідження особливостей умов взаємодії магнітно-абразивного інструменту (МАІ) з оброблюваними деталями при МАО в

умовах великих магнітних зазорів кільцевого типу в залежності від технологічних параметрів процесу.

4. Розробити рекомендації щодо оброблення в магнітних системах кільцевого типу.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу

7. Орієнтовний перелік публікацій: три публікації наведені в додатку Б

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка

Студент

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

АНОТАЦІЯ

Заставський К.О. Дослідження силових характеристик взаємодії інструменту з деталлю при магнітно-абразивному обробленні у кільцевій ванні.

Дисертація на здобуття наукового ступеня магістра за спеціальністю 131 – прикладне машинобудування. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ, 2019.

Виконано аналіз відомостей про процес та схеми магнітно-абразивного оброблення (МАО). Визначено фактори, що впливають на силові характеристики при обробленні.

В роботі досліджено особливості зміни величини ефективного моменту в робочій зоні кільцевого типу в умовах великих магнітних зазорів при зміні технологічних факторів на оброблення.

Зроблено висновки, що оброблення оскольчастим порошком як феромагнітних, так і парамагнітних матеріалів доцільно проводити на низьких швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни (100 – 150 об/хв) та високих швидкостях обертання деталі навколо своєї осі (60 – 80 рад/с). При використанні округлого порошку, доцільно проводити оброблення на високих швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни (200 – 300 об/хв) та високих швидкостях обертання деталі навколо своєї осі (60 – 80 рад/с).

Встановлено, що збільшення швидкості обертання деталі навколо своєї осі (більше 80 – 90 рад/с) відбувається різка зміна ефективного моменту викликана комплексом сил адгезійної взаємодії, псевдорозрідження, пондеромоторними силами та поворотом зерен МАІ.

Визначено що в умовах великих магнітних зазорів вплив магнітної індукції мінімальний.

Ключові слова: магнітно-абразивне оброблення, робоча зона кільцевого типу, оброблення в умовах великого магнітного зазору, ефективний момент, силові характеристики, силова взаємодія, магнітна індукція.

SUMMARY

Zastavskiy K.O. Study of the power characteristics of the interactions between tool and detail during magnetic abrasive machining in the ring type working zone.

Dissertation for obtaining a Master's degree in specialty 131 – applied mechanical engineering. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". – Kyiv, 2019.

The analysis of the information about the process and the schemes of magnetic-abrasive processing is performed. The factors influencing the power characteristics during processing are determined.

The dependence of the effective machining torque in the working zone of the annular type under conditions of large magnetic gaps when changing the factors affecting the machining is investigated.

It is concluded that the processing of both ferromagnetic and paramagnetic materials with comminuted powder is advisable to perform at low rotational speeds around the axis of the annular bath (100 – 150 rpm) and high rotational speeds of the workpiece around its axis (60 – 80 rad/sec). When using a round powder, it is advisable to perform machining at high rotational speeds around the axis of the annular bath (200 – 300 rpm) and high rotational speeds of the workpiece around its axis (60 – 80 rad/sec).

It is established that the increase of the speed of rotation of the workpiece around its axis (more than 80 – 90 rad/sec) is a sharp change in the effective torque caused by the complex forces of adhesive interaction, fluidization, ponderomotor forces and rotation of MAI grains.

It is determined that under the conditions of large magnetic gaps the influence of magnetic induction is minimal.

Keywords: magnetic-abrasive machining, work zone of annular type, machining in conditions of large magnetic gap, effective moment, power characteristics, force interaction, magnetic induction.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ В ГАЛУЗІ МАО.....	11
1.1 Огляд існуючих схем МАО.....	11
1.2 Основні складові верстатів для МАО.....	16
1.3 Кінематика оброблення при МАО.....	18
1.4 Магнітне поле.....	19
1.5 Порошки що використовуються при МАО.....	19
1.6 Магнітні властивості порошків.....	21
1.7 Дія змочувально-охолоджувального технологічного середовища на процес магнітно-абразивного оброблення.....	22
1.8 Сили що виникають при МАО.....	23
1.9 Висновки.....	28
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗУСИЛЬ, ЩО ВИНΙΚАЮТЬ В ПРОЦЕСІ МАО В УМОВАХ КІЛЬЦЕВОЇ ВАННИ.....	29
2.1 Обладнання для проведення досліджень.....	29
2.2 Сили та обладнання для їх досліджень при МАО.....	33
2.3 Методика вимірювання сил при МАО опосередкованим методом....	34
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	38
3.1 Визначення силової взаємодії шляхом знаходження крутного моменту на двигуні мінішпинделя.....	38
3.1.1 Визначення моменту холостого ходу.....	38
3.1.2 Визначення ефективного моменту.....	38
3.1.3 Визначення дійсного моменту при обробленні.....	39
3.1.4 Визначення ефективного моменту при обробленні зразків зі сплаву алюмінію Д-16 оскольчастим порошком Полімам-Т.....	40
3.1.5 Визначення ефективного моменту при обробленні зразків зі сплаву алюмінію Д-16 округлим порошком Полімам-М.....	46

3.1.6 Визначення ефективного моменту при обробленні сплаву титану ВТ-8 оскольчастим порошком Полімам-Т.....	49
3.1.7 Визначення ефективного моменту при обробленні сплаву титану ВТ-8 округлим порошком Полімам-М.....	54
3.1.8 Визначення ефективного моменту при обробленні бронзи БраЖ оскольчастим порошком Полімам-Т.....	57
3.1.9 Визначення ефективного моменту при обробленні бронзи БраЖ округлим порошком Полімам-М.....	62
3.1.10 Ефективний момент при обробленні сталі 40Х13 оскольчастим порошком Полімам-Т.....	65
3.1.11 Визначення ефективного моменту при обробленні сталі 40Х13 округлим порошком Полімам-М.....	69
3.2 Порівняння результатів вимірювання при обробленні феро- та парамагнітних матеріалів.....	72
3.2.1 МАІ сформовано з магнітно-абразивного порошку Полімам-Т.....	72
3.2.2 МАІ сформовано з магнітно-абразивного порошку Полімам-М.....	73
3.2.3 Оброблення парамагнітних матеріалів.....	75
3.3 Висновки.....	81
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	83
4.1 Опис ідеї проекту.....	83
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	84
4.3 Аналіз ринкових можливостей стартап-проекту.....	85
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	87
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	91
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	92
ДОДАТОК А.....	97
ДОДАТОК Б.....	99

ВСТУП

Актуальність теми

Магнітно-абразивне оброблення (МАО) є перспективним методом фінішного оброблення, що здатен забезпечувати високі параметри якості поверхонь, оптимальні мікрогеометрію і фізико-механічні властивості деталей складної форми та з різних матеріалів, таких як різальний інструмент (свердла, мітчики, фрези), лопатки газотурбінних двигунів, медичний інструмент. На фінішних етапах оброблення методу МАО може забезпечувати високу якість поверхні на складних деталях, необхідне заокруглення різальних кромek, зміцнення поверхневого шару, підготовка поверхні до нанесення покриттів. З огляду на складність та відносну новизну методу процеси і явища що відбуваються при МАО досліджені не в достатній мірі. Існуючі роботи по дослідженню оброблення не розкривають повної картини. Тому необхідно проводити комплекс досліджень зі зміною різних факторів що впливають на оброблення. Вивчення процесів і явищ, що виникають при МАО, зокрема визначення силової взаємодії при обробленні, сприяють поширенню застосування методу через можливість точного проектування обладнання, Що забезпечить зменшення ризиків виходу обладнання з ладу та підвищить надійність і ефективність виробництва.

Метою роботи є дослідження особливостей силової взаємодії магнітно-абразивного інструменту (МАІ) при МАО в умовах великих магнітних зазорів кільцевого типу при зміні технологічних параметрів процесу.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Проаналізувати особливості процесу МАО та існуючих фінішних методів оброблення різального інструменту;
2. Розробити методики для дослідження силової взаємодії при МАО;
3. Виконати дослідження особливостей умов взаємодії магнітно-абразивного інструменту (МАІ) з оброблюваними деталями при МАО в

умовах великих магнітних зазорів кільцевого типу в залежності від технологічних параметрів процесу.

4. Розробити рекомендації щодо оброблення в магнітних системах кільцевого типу.

Об'єкт дослідження. Силкові характеристики взаємодії оброблюваної деталі з МАІ при магнітно-абразивному обробленні.

Предмет дослідження. Процес МАО.

Методи дослідження для вирішення поставлених задач дослідження було використано теорію магнітного поля, теорії контактної взаємодії, реології, теорії різання, основні положення магнетизму, матеріалознавства, трибології.

Наукова новизна Визначено особливості силової взаємодії під час МАО при обробленні парамагнітних та феромагнітних матеріалів при зміні технологічних параметрів процесу.

1) Встановлено значення сил, що виникають в МАІ при обертанні циліндричних деталей в умовах великих магнітних зазорів.

2) Визначено вплив швидкостей різання (головної та кругової подачі) та матеріалу деталі на динамічну силову взаємодію при обробленні в умовах великих магнітних зазорів.

3) Встановлено вплив напруженості магнітного поля та магнітних властивостей матеріалів на характер взаємодії при обробленні

4) Визначено вплив марок і зернистості магнітно-абразивних порошоків (МАП) на оброблення в робочій зоні кільцевого типу

5) Розроблено рекомендації по обробленню матеріалів: сталь 40Х13, бронза БраЖ, сплави алюмінію Д-16 та титану ВТ-8.

Практичне значення Визначені силкові взаємодії при обробленні парамагнітних та феромагнітних матеріалів при зміні технологічних умов при обробленні в робочій зоні кільцевого типу в великому магнітному зазорі. Отримані залежності доцільно використовувати у виробництві та науці при

обробленні матеріалів: сталь 40Х13, бронза БраЖ, сплави алюмінію Д-16 та титану ВТ-8.

Особистий внесок здобувача. Автором сформульовано мету та задачі, що вирішуються в дисертаційній роботі. Встановлено закономірності зміни силової взаємодії при МАО в великих магнітних зазорах при зміні швидкостей різання, магнітної індукції, матеріалу деталі, магнітно-абразивного порошку та його зернистості. Розроблено рекомендації, щодо оброблення матеріалів: сталь 40Х13, бронза БраЖ, сплави алюмінію Д-16 та титану ВТ-8.

Публікації. Результати дослідження представлено в 2 тезах доповідей в збірниках матеріалів конференцій та 1 наукової статті.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, списку використаних джерел зі 32 найменувань та додатків. Основний текст дисертації викладено на 96 сторінках, що містять 47 рисунків, 15 таблиць. Повний обсяг дисертації становить 111 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ В ГАЛУЗІ МАО

Магнітно абразивне оброблення це перспективний метод фінішного оброблення деталей різних форм. Особливість цього методу полягає в абразивному обробленні деталі при переміщенні деталі в середовищі абразивних зерен що утримуються в магнітному полі.

Це дозволяє магнітно-абразивному інструменту (МАІ) нівелювати відносно оброблюваної поверхні, повторювати форму деталі, а також змінювати свою жорсткість. МАО дозволяє обробляти деталі з високою точністю, малим відхиленням від форми і шорсткістю $Ra\ 0,01 - 0,4\ \mu\text{m}$. З огляду на це, можливе оброблення деталей різної просторової конфігурації та , наприклад: різальний інструмент (фрези, мітчики, різальні пластини, свердла і т.д.), лопатки газотурбінних двигунів, медичні інструменти та вироби, деталі механізмів обчислювальної техніки, матриць і пуансонів штампів та пресформ [1, 2, 4, 13, 16, 25]. Для різального інструменту, процес МАО забезпечує не тільки полірування робочих частин інструменту, а ще і зміцнення поверхневого шару матеріалу, утворення необхідних радіусів заокруглення різальних кромок. Тому магнітно-абразивне оброблення вигідно використовувати для виготовлення різального інструменту. Різноманітність деталей викликає і різноманітність схем оброблення. Процес МАО та різноманітність його схем викликає велику кількість факторів, що впливають на оброблення, створюють додаткові процеси та явища, що у свою чергу ще більше змінюють характеристики оброблення [1, 2, 12, 14, 16, 24, 25, 27 – 32].

1.1 Огляд існуючих схем МАО

За допомогою МАО можливе виконання таких операцій як полірування деталей різної форми, заокруглення різальних кромок, видалення окалини, зміцнення матеріалів. Від виду оброблюваної деталі залежить і схема оброблення. Оброблювана деталь, її розміри, форма, матеріал впливають на

вибір схем та обладнання для оброблення, тому кількість схем може зумовлюватися кількістю деталей, що існують в сучасному машинобудуванні. Існує більше 350 різноманітних схем і винаходів що використовуються при МАО [4].

Існують класифікації схем по таким параметрам: відносними рухами деталі, видом оброблюваної поверхні, функціональним використанням магнітного поля.

Для оброблення зовнішніх поверхонь тіл обертання застосовується пристосування, що встановлюється на верстат токарного типу. На рис. 1.1 зображена схема установки що складається з полюсних наконечників 1 та деталі 2 що розташовується між полюсниками. Зазор між деталлю та магнітами заповнюється порошком МАІ 3 [2]. Деталь при обробленні обертається навколо своєї осі, рух подачі здійснюється вздовж осі. Можливе розташування полюсних наконечників тільки з одного боку.

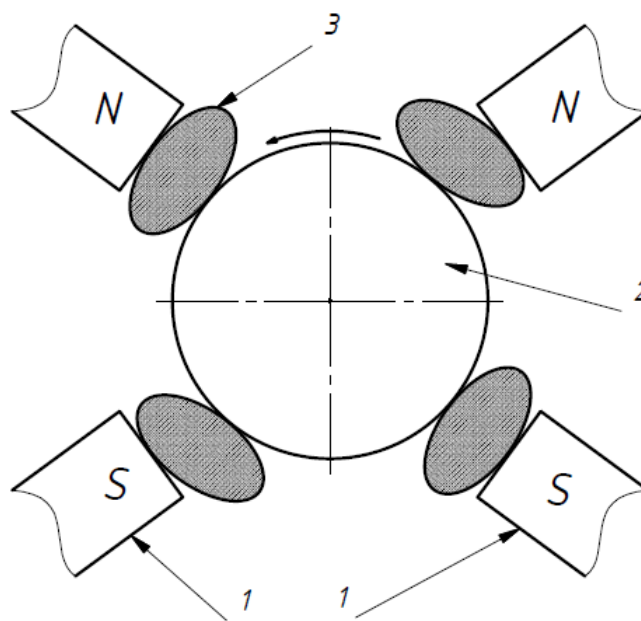


Рисунок 1.1 – Схема МАО циліндричних деталей

На рис. 1.2 зображено оброблення внутрішньої поверхні тонкостінної циліндричної деталі. Електромагніт 1 притискає порцію МАП 2 до

внутрішньої поверхні деталі 3 [4]. Деталь при обробленні обертається навколо своєї осі, рух подачі здійснюється вздовж осі.

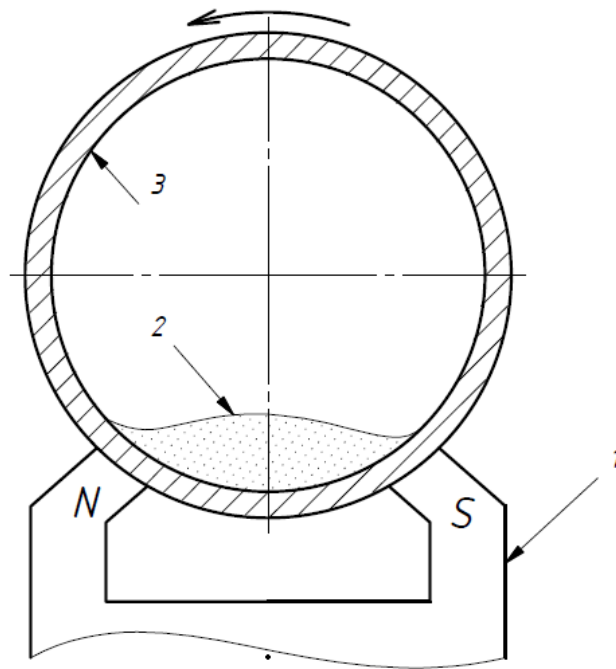


Рисунок 1.2 – Схема МАО внутрішніх поверхонь циліндричних деталей

Для обробки площин застосовується схема зображена на рис. 1.3. Установка складається індуктора 1, на якому по кільцю почергово розташовані полюсники та постійні магніти 2. Порошок 3 обертається разом з індуктором і здійснює оброблення деталі 4. Деталь поступово рухається і здійснює цим рух подачі [4].

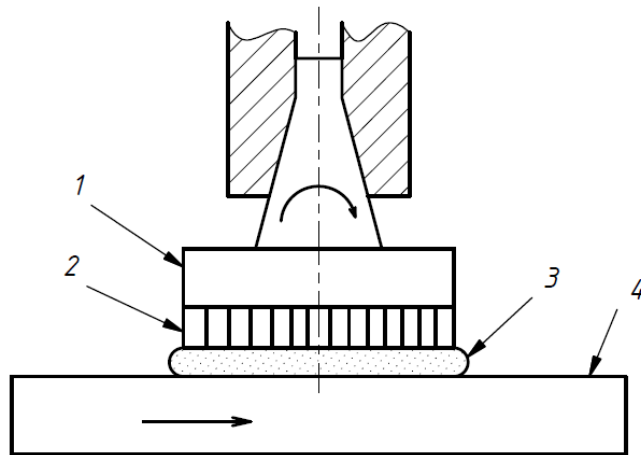


Рисунок 1.3 – Схема МАО плоских поверхонь

Схожа схема для магнітно-абразивного полірування кремнієвих пластин представлена в роботі [26] (рис. 1.4). Згідно цієї схеми деталь 1 обертається навколо своєї осі забезпечуючи рух подачі, з обох сторін деталі розташовані циліндричні магнітні полюсні наконечники 2, що обертаються навколо своїх осей (головний рух різання). Між деталлю та полюсними наконечниками розташований магнітно-абразивний порошок 3.

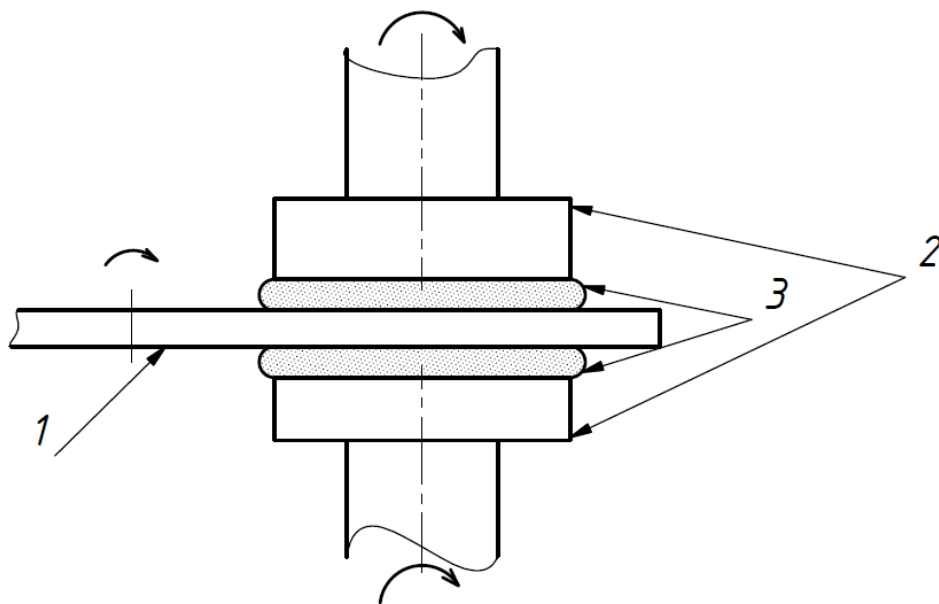
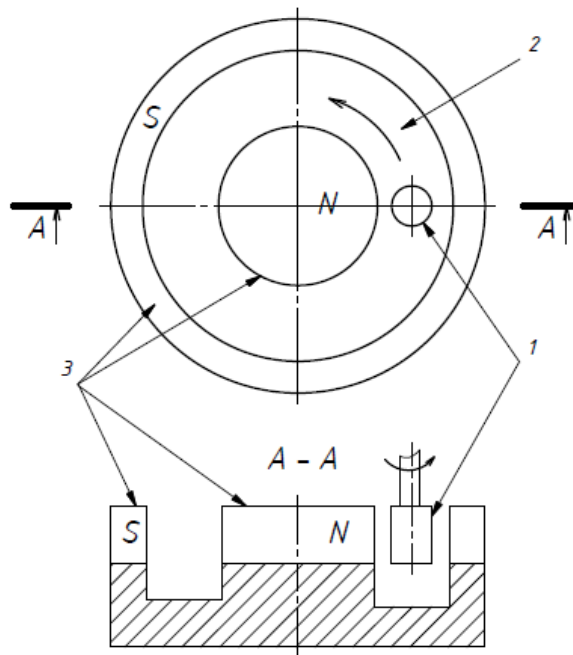


Рисунок 1.4 – Схема МАО для оброблення пластин

Схеми з робочою зоною у вигляді кільця дозволяють обробляти деталі складної форми (наприклад різальний інструмент та лопатки газотурбінних двигунів) при великих магнітних зазорах. Схема такого верстата зображена на рис. 1.5. Деталь 1 обертається навколо своєї осі (рух кругової подачі) та навколо осі верстату (головний рух різання) в робочому зазорі 2, наповненому МАП. Зазор утворений кільцевими магнітними полюсами 3 [2, 4, 6, 12, 16].



Рисунку 1.5 – Схема МАО в кільцевому зазорі

МАО з кільцевою зоною

Установки з кільцевою робочою зоною поділяються на установки з радіальним завантаженням (кільцева ванна утворена торцями полюсних наконечників), та з торцевим завантаженням (робоча зона утворена циліндричними поверхнями дискових полюсних наконечників) [1, 2, 4, 6, 13] рис. 1.5. Магнітні системи кільцевого типу отримали велике поширення при обробленні деталей складної форми та різних розмірів, таких як кінцевий різальний інструмент, лопатки газотурбінних двигунів і т. д. Ці деталі доцільно обробляти в установках з кільцевою ванною через переваги, що мають ці схеми:

- вища продуктивність за рахунок роторного принципу;
- широкі можливості зміни технологічних параметрів (величина робочого зазору, регулювання швидкості оброблення, регулювання магнітної індукції, базування деталей);
- підвищена здатність до перемішування МАІ в робочому зазорі що позитивно впливає на стабільність оброблення [2, 4, 6, 16].

1.2 Основні складові верстатів для МАО

Умовно конструкцію верстатів для МАО можна поділити на декілька основних елементів: магнітної системи з постійних або електромагнітів, що забезпечує формування МАІ, зміну його жорсткості, забезпечення силового навантаження через магнітну енергію; магнітно-абразивного порошку що виконує роль різального елемента; та пристрою що забезпечує переміщення деталі в МАІ і залежить від оброблюваної деталі [13]. Одним з важливих елементів магнітної системи є полюсні наконечники, що в процесі МАО формують МАІ, створюють сприятливий градієнт магнітного поля в робочих зазорах де відбувається оброблення [3, 13, 24, 29].

Велику роль в характеристиці взаємодії між порошком та деталлю відіграє величина магнітного зазору (відстані між поверхнею деталі та магнітними полюсними наконечниками). Магнітний зазор залежить від типу оброблюваних деталей і в порівнянні з розмірами частинок порошку, що використовують - λ , може бути малий ($h = (3 - 5)\lambda$) та великий ($h \geq 10\lambda$). Малий зазор використовується для оброблення деталей простої форми. Для деталей складної форми, таких як свердла, фрези, мітчики, лопатки ГТД використовують великий магнітний зазор. При малому зазорі основний вплив на взаємодію між деталлю та МАІ спричиняє магнітне поле та процеси, що відбуваються при формуванні МАІ між полюсними наконечниками і оброблюваними поверхнями у вигляді заклинювання порошку в зазорі, при збільшенні магнітного зазору вплив магнітної індукції зменшується. Тому при використанні великих зазорів на перше місце виходить динамічний чинник

пов'язаний з швидкістю оброблення і траєкторією рух деталей в робочих зонах від яких залежить ефективність оброблення [6, 8, 16]. Необхідно відзначити, що при обробленні в умовах великих магнітних зазорів критичною є міцність частинок порошку, тому для такої схеми застосовують порошки отримані методом диспергування розплаву з підвищеною міцністю [2, 16].

Крім розміру магнітного зазору, на MAO впливає форма робочої зони що утворюється полюсними магнітними наконечниками, їх формою і особливостями розташування відносно оброблюваних деталей. На рис. 1.6 зображені типи зазорів – еквідистантний (а), не еквідистантний (б), коаксіальний (в), еліпсоподібний (г), та серповидний (д) [13].

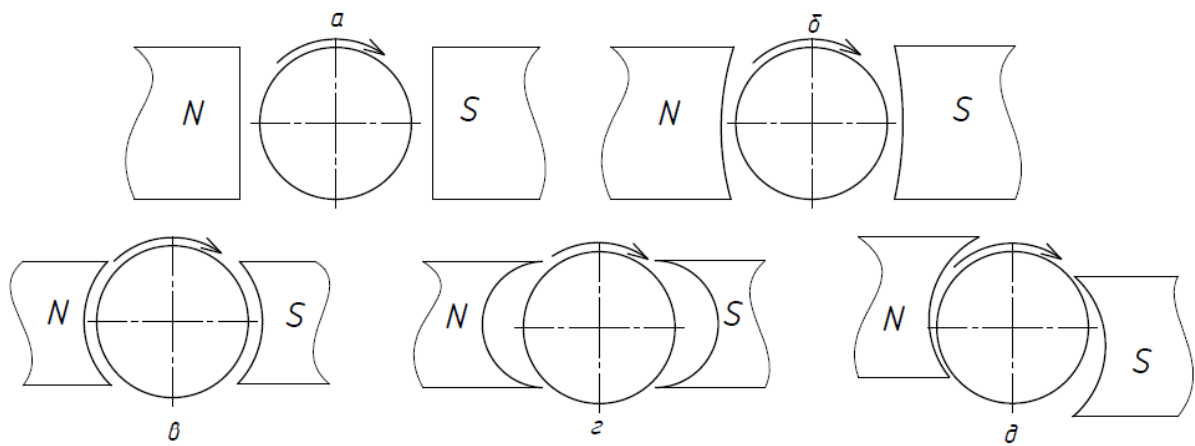


Рисунок 1.6 – Форми полюсних магнітних наконечників

Від форми полюсних магнітних наконечників залежить величина зазору в різних його поперечних перерізах та градієнт магнітного поля в робочій зоні. Звідси, зміна особливостей взаємодії MAI з деталлю і характер сил різання [2]. Тому при обробленні деталей різної форми доцільно обирати різні форми полюсних магнітних наконечників [5]. На оброблення також має вплив наявність концентраторів магнітного потоку. При дослідженнях було виявлено, що на гранях полюсних магнітних наконечників відбувається концентрація магнітних потоків, що призводить в цих зонах до скупчення порошку, перерозподіл MAI і зусиль оброблення по робочій зоні [1, 5, 7, 16, 24]. Створенням додаткових виступів і западин на полюсних наконечниках

можливо змінювати конфігурацію магнітного потоку в залежності від конфігурації оброблюваної деталі [13, 16]. На рис. 1.7 зображені деякі типові форми концентраторів [13].

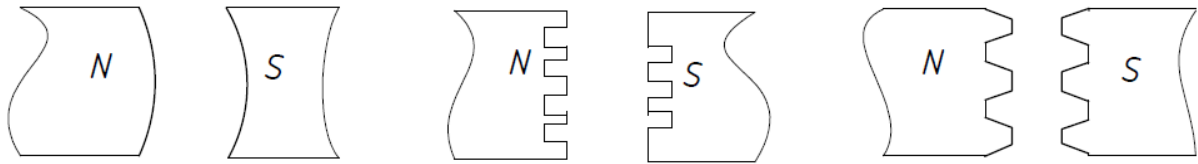


Рисунок 1.7 – Форми концентраторів

1.3 Кінематика оброблення при МАО

З огляду на різноманітність оброблюваних деталей, їх форми та розмірів існує велика кількість кінематичних схем МАО. По характеру і кількості відносних рухів порошку і деталі, доцільно згрупувати схеми на наступні класи [1, 4, 12, 21, 25]. *Клас схем оброблення плоских поверхонь* де поверхня може рухатися дискретно в трьох напрямках, залишатися нерухомою, або створювати комбінований рух, магнітна система може виконувати прості або складні рухи відносно оброблюваної деталі, задаючи кінематичну енергію різальним елементам порошку. *Клас схем оброблення при циклічно рухомих елементах порошку* де магнітна система і деталь нерухомі, а магнітно-абразивний порошок виконує зворотньо-поступальні рухи за рахунок зміни полярності магнітів. Для класу схем оброблення при стаціонарному положенні порошку характерний рух деталі або магнітної системи в середовищі порошку що утримується в робочій зоні силами магнітного поля. *Клас схем оброблення сферичних поверхонь* де виконуються комбіновані рухи і схеми, що дозволяють оброблювати сферичні поверхні [21]. Найбільш широко використовуються схеми з стаціонарним положенням порошку [21], серед них раціональною схемою для оброблення деталей складної форми є схема з кільцевим робочим зазором. В цій схемі деталь, що рухається в середовищі магнітно-абразивного порошку виконує складний рух , наприклад

обертальний навколо власної осі та обертальний навколо осі ванни, осциляцію вздовж осі ванні, зміна кута повороту та інші [2, 12, 16, 21].

1.4 Магнітне поле

При магнітно абразивному обробленні порція магнітно-абразивного порошку утримується в робочій зоні за рахунок дії магнітного поля і під дією динамічних сил, які виникають при переміщенні деталі формується порошковий магнітно-абразивний інструмент (МАІ) у вигляді щіток які взаємодіють з деталлю. За допомогою зміни напруження магнітного поля можливо змінювати жорсткість щіток що, в свою чергу, змінює зусилля з яким порошок притискається до деталі [4]. Збільшення значень магнітної індукції збільшує нормальні навантаження при обробленні, що показано в роботах [4-6, 21].

1.5 Порошки що використовуються при МАО

Сьогодні існує велика кількість магнітно-абразивних порошків. Правильний вибір порошку впливає на якість та продуктивність оброблення. Основні фактори для вибору порошку це магнітні властивості, твердість, реакція з оброблюваним виробом, міцність та структура частинок [1, 15, 17, 21]. Найбільш зручна класифікація – по способу отримання порошку та його структурі. Різні способи отримання порошків впливають на поєднання двох головних складових порошку: феромагнітної (частинки заліза або магнітних сплавів) та абразивної (абразивний матеріал).

1-й тип порошків (рис. 1.8) – порошки виготовлені з матеріалів, твердіших ніж оброблюваний матеріал (наприклад чавун) або отримані методом диспергування розплаву. 2-й тип складається з феромагнітної матриці та абразивного наповнювача, цей тип виготовляють шляхом порошкової металургії – 2а, або розпиленням з розплаву – 2б (найбільш часто використовуються для утворення МАІ).

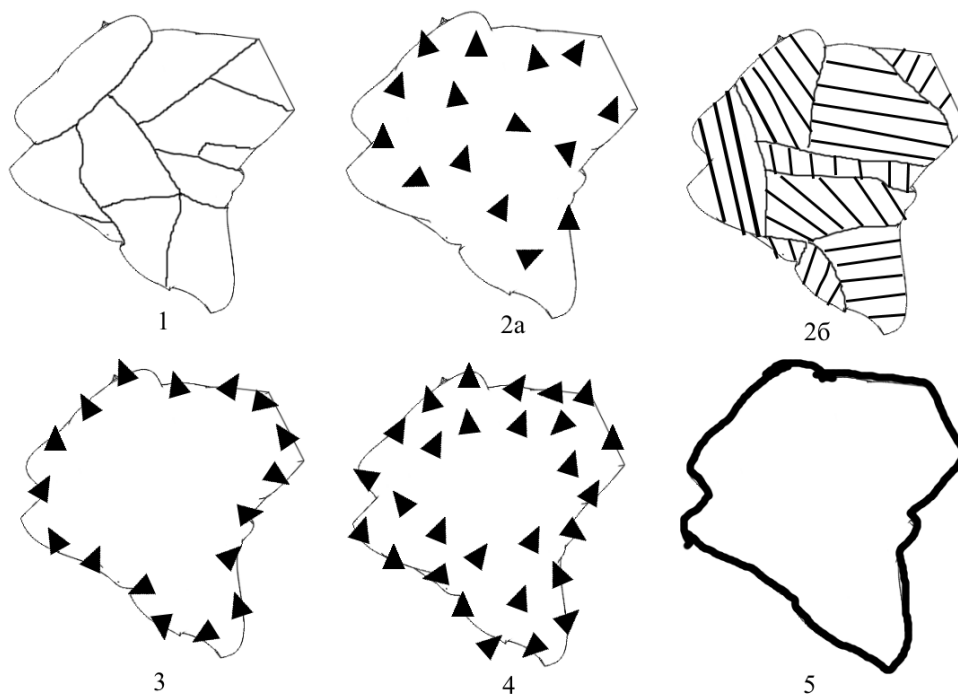


Рисунок 1.8 – Структури зерен МАП

Типи 3 та 4 представляють собою порошки з феромагнітним ядром та багатошаровим абразивним поверхневим шаром (четвертий тип має абразивну поверхню різного складу), отримуються такі порошки шляхом прокатки порошків заліза з та абразиву або шляхами внутрішньої цементації. 5-й тип складається з залізного ядра повністю покритого абразивним матеріалом шляхом борування порошку або його окислення [1, 2, 4, 15, 17, 19]. Ще одним видом МАП є механічні суміші, що представляють собою намагнічувані частинки, які можуть складатися з абразивних та магнітно м'яких (залізо) або магнітно-твердих (ферити, сплави залізо – алюміній – нікель) частинок. Механічні суміші застосовують при умовах рухомих магнітних полів, в яких магнітні частинки ініціюють рух абразивних, як правило таке оброблення виконують в суспензії [15, 17].

Всі порошки залежно від способу отримання мають неправильну геометричну форму, різну кількість різальних кромek та їх різну мікрогеометрію. Від цього залежить і ефективність оброблення. Порошки поділяються за формою на оскольчасті, отримані в результаті розмелу

розплавів (наприклад Полімам-Т, Ферромап, дріб чавунний колотий – ДЧК), та округлі, що отримуються шляхом розпилення розплавів без розмелу (ПР Р6М5, Полімам-М_{сф}, Царамам, дріб чавунна - ДЧ) [16]. Форма впливає на характер взаємодії МАІ з оброблюваною деталлю. Наприклад, порошки округлої форми забезпечують полірування шляхом розгладження поверхні деталі, натомість оскольчасті порошки забезпечують зняття мікростружки з поверхні деталі [2, 16, 19]. Сферична форма порошку сприяє перемішуванню порошку в робочій зоні та підвищенню інтенсивності різання шляхом вступу в оброблення кожного зерна МАП [2, 4]. За розміром використовуються порошки з різним фракційним складом від 100/63 до 1000/630 мкм [16]. Для характеристики форми магнітно – абразивного порошку застосовують коефіцієнт нерівності k_f , що ідентифікує форму і подовження окремих частинок. Коефіцієнт нерівності це співвідношення $k_f = b/a$, де b довжина зерна, та a – ширина (рис. 1.9).

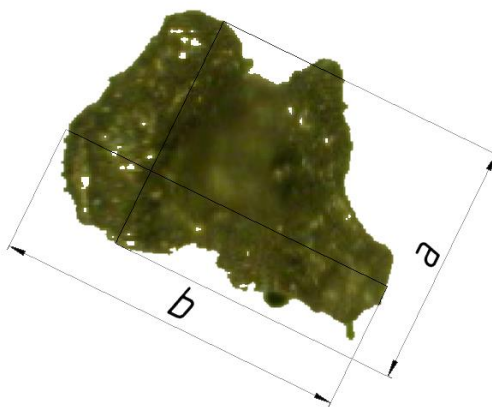


Рисунок 1.9 – Співвідношення розмірів зерна МАП

Визначають порошки: рівновісні (коефіцієнт нерівності $k_f \leq 1,6$) та нерівновісні ($k_f > 1,6$) [16].

1.6 Магнітні властивості порошків

Під час магнітно абразивного оброблення на зерна МАП діють сили магнітного поля, від них залежить утримання порошку в робочій зоні,

жорсткість порошку та його здатність зняття матеріалу з деталі. Характеристиками взаємодії магнітного поля з МАП є магнітна проникність порошку, магнітна індукція та її градієнт на границях робочої зони, а також величина намагніченості порошку що залежить від структури порошку та температури навколишнього середовища [2, 4, 17]. Для забезпечення роботоздатності МАІ потрібно створити магнітну індукцію за допомогою збільшення потужності джерела магнітного поля, або менш енергозатратним способом – порошок повинен мати індукцію насичення, що перевищує значення діапазону індукцій (0,8 – 1,4 Тл) [4]. Магнітні властивості порошку безпосередньо залежать від феромагнітної складової порошку, отже збільшення частки магнітної складової дозволяє покращити взаємодію між порошком та магнітним полем, однак МАП повинен також забезпечувати необхідні різальні властивості, а підвищена частка феритів не сприяє підвищенню твердості. Композиційні порошки на феромагнітній основі з абразивними включеннями дозволяють отримати високі твердість та магнітні властивості МАП [4].

1.7 Дія змочувально-охолоджувального технологічного середовища на процес магнітно-абразивного оброблення.

Застосування змочувально -охолоджуючих технологічних середовищ (ЗОТС) дозволяє вирішити ряд завдань при обробленні. З огляду на особливості процесу, при магнітно-абразивному обробленні до ЗОТС ставляться особливі вимоги.

Через малі температури при магнітно-абразивному обробленні (60 – 150 °C) [25] не має потреби у значному охолодженні зони різання.

Абсорбуючий ефект проявляється в можливості поверхнево-активних речовин (ПАВ) ЗОТС абсорбуватися на стінках мікротріщин, знижувати міцність поверхневого шару деталі та полегшувати процес його оброблення [25].

Миючий ефект забезпечує покращений відвід мікростружки з зони різання та полегшує рух зерен МАІ в робочій зоні, що у свою чергу інтенсифікує процес самозагострення зерен магнітно-абразивного порошку [6, 24, 25].

Ці ефекти впливають на процес магнітно-абразивного оброблення шляхом зміни сил і напружень при взаємодії магнітно-абразивного інструменту та деталі.

1.8 Сили що виникають при МАО [4,21]

В процесі магнітно абразивного оброблення на деталь та порошок діє комплекс сил магнітного, електричного та механічного походження. На сили впливають фактори магнітного поля, властивостей порошку, схеми оброблення, наявності МОТС, режимів оброблення і т.д.

Силу що діє на зерна та деталь в процесі оброблення можна розглянути як сумарний вектор F_p з векторів магнітних сил, сил інерції, тертя, тяжіння, відцентрової сили, сил механічного тиску [4, 6, 9, 24, 32].

$$F_p = F_m + F_{m1} + F_{em} + F_{em1} + F_t + F_{in} + F_{вц}$$

На рис. 1.10 показано схеми дії складових сил на частинки порошку (а) та деталь (б).

Магнітні сили впливають на поведінку зерен МАП в процесі, на формування та жорсткість МАП. При обробленні феромагнітних матеріалів, магнітні сили впливають на поведінку деталі в магнітному зазорі [1 – 4, 6, 16]. Регулюються магнітні сили за рахунок зміни значення магнітної індукції, наявністю концентраторів магнітного поля, формою магнітного зазору, магнітною проникністю порошку [1 – 3, 11, 16, 17].

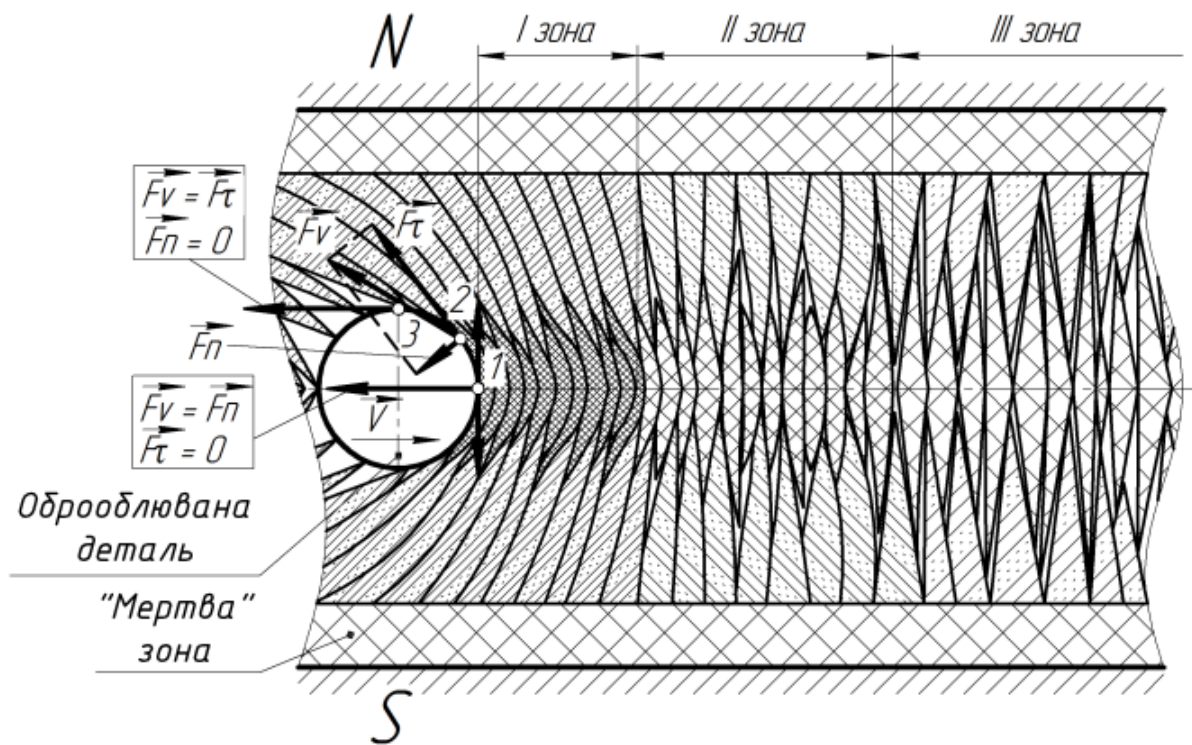


Рисунок 1.11 – Схема взаємодії структурних елементів МАІ з оброблюваними поверхнями деталі [16, 24]

За цими точками розташована «тіньова» зона в якій з деталлю контактують тільки конусоподібні стовпчики які замикаються за деталлю. В цій зоні навантаження практично відсутні тому відсутнє і оброблення. При обертанні деталі навколо своєї осі оброблюється вся поверхня деталі та змінюється співвідношення нормальної та тангенціальної сили. А саме відбувається підвищення тангенціальної сили тертя між оброблюваною поверхнею та магнітно-абразивним порошком з підвищенням швидкостей обертання деталі навколо своєї осі [6, 16].

При МАО в умовах малих робочих зазорів для магнітно-абразивного оброблення характерна неоднорідність зусилля на поверхні деталі. Згідно з досліджень, тиск що діє на поверхню деталі неоднорідний і збільшується при зменшенні магнітного зазору що викликано заклинюванням порошку в цих зонах [1, 4, 8, 16, 24]. Варто зазначити, що при обробленні деталей в кільцевих ваннах з великим магнітним зазором має явище динамічного заклинювання. При такій схемі оброблення деталь обертається навколо своєї осі та «затягує»

масу порошку в сторону свого руху, на поверхню деталі починають діяти тангенціальні сили. Затягнутий порошок ущільнюється між поверхнею деталі та полюсним наконечником створюючи динамічне заклинювання, що збільшує нормальну складову тиску на поверхню деталі. Додатково, біля полюсних магнітних наконечників, посилюється дія магнітного поля на порошок, що сприяє підвищенню його жорсткості [16]. Епюра тиску при обробленні циліндричних деталей зображена на рис. 1.12.

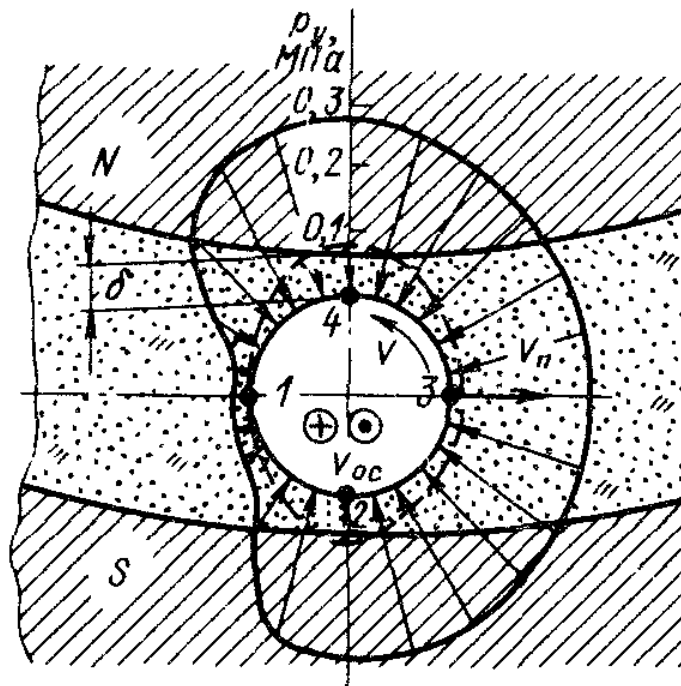


Рисунок 1.12 – Епюра розподілу тиску порошку на поверхню деталі [4, 13]

В табл. 1.1 [4, 6, 13] показано імовірні значення окремих складових сил. Згідно цих даних, доцільно розглядати тільки фактори, що найбільше впливають на оброблення.

Згідно з складністю процесу та обмеженою інформацією про процеси та явища що відбуваються при MAO, складно конкретно судити про зусилля що виникають в процесі оброблення. Створення обладнання для MAO ускладнене без розуміння цих процесів. Автори [4, 6, 8, 9, 11, 16, 27 – 31] наводять деякі дослідження в цій сфері, але інформації вкрай мало.

Таблиця 1.1 – Вірогідні значення складових сил що діють на зерно порошку в процесі МАО [4, 6].

Фізична сила	Позначення	Значення сили, Н
Магнітна сила, викликана взаємодією молекулярних токів матеріалу зерна з зовнішнім полем	F_M	$(2...10) \cdot 10^{-4}$
Додаткова магнітна сила, викликана прагненням еліпсоїдного зерна орієнтуватись вздовж силових ліній поля	F_{M1}	$(7...15) \cdot 10^{-4}$
Електромагнітна сила взаємодії індукційних токів зерна з зовнішнім пульсуючим полем	F_{em}	$(2...12) \cdot 10^{-9}$
Електромагнітна сила взаємодії індукційних токів зерна в робочому зазорі	F_{em1}	$4 \cdot 10^{-9} .. 2 \cdot 10^{-7}$
Сила тяжіння	F_T	$2,5 \cdot 10^{-7}$
Сила інерції, що виникає при зіткненні зерна , що рухається з оброблюваною поверхнею	F_{in}	$6,5 \cdot 10^{-6}$
Відцентрова сила, що виникає при обертанні зерна з магнітним індуктором	$F_{вц}$	$(1...1) \cdot 10^{-6}$

Загалом дослідження проводились в умовах малих магнітних зазорів [27 – 30], для великих магнітних зазорів цієї інформації ще менше. Тому для створення обладнання та широкого використання МАО в виробництві потрібні додаткові дослідження.

Висновки

1. Установки зі кільцевою робочою зоною забезпечують можливість обробки деталей різних розмірів та форми, з різними технологічними параметрами, та з високою продуктивністю.

2. На характер силової взаємодії оброблюваної деталі та магнітно-абразивного інструменту (МАІ) впливає комплекс факторів магнітного, механічного, інерційного та електричного походження. Проте найбільший вплив мають магнітні сили та тиск порошку МАІ на поверхню.

3. Технологічні параметри оброблення, такі як схема установки, форма полюсних наконечників, марка магнітно-абразивного порошку, величина магнітної індукції, кінематика і динаміка оброблення, властивості оброблюваного матеріалу, величина магнітного зазору можуть значно вплинути на силову взаємодію при обробленні.

4. Існуючі дослідження не дають достатньо інформації про процеси та явища при МАО.

5. Особливості методу оброблення ускладнюють процес дослідження силових навантажень.

Метою роботи є дослідження силової взаємодії при МАО в умовах великих магнітних зазорів кільцевого типу при зміні технологічних параметрів процесу.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести аналіз особливостей процесу МАО та існуючих методів оброблення.

2. Розробити методики для дослідження силової взаємодії при МАО.

3. Виконати дослідження процесів та явищ, що виникають при МАО в умовах великих магнітних зазорів кільцевого типу.

4. Розробити рекомендації щодо оброблення в магнітних системах кільцевого типу.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗУСИЛЬ, ЩО ВИНИКАЮТЬ В ПРОЦЕСІ МАО В УМОВАХ КІЛЬЦЕВОЇ ВАННИ

2.1 Обладнання для проведення досліджень

Для проведення експериментальних досліджень було застосовано установку типу кільцева ванна, яка реалізована на вертикально-фрезерному станку типу ОЦ – Іжевськ, що призначена для МАО різального інструменту, лопаток газотурбінних двигунів та інших деталей зі складним профілем [6, 16].

Технологічне налагодження до вертикально-фрезерного верстату (рис. 2.1) складається з магнітної системи (1), встановленої на нерухомому горизонтальному робочому столі та універсальної головки (2), що кріпиться до шпинделя верстата (3), який має можливість рухатися у вертикальному напрямку. Вісь шпинделя співпадає з вертикальною віссю магнітної системи. Магнітна система складається з симетричного магнітопроводу з коаксіально направленими полюсними наконечниками (5), які утворюють між собою кільцеву робочу зону (6), що заповнюється магнітно абразивним порошком (МАП), порошок під дією магнітного поля формується в МАІ. Діаметр кільцевої робочої зони складає 200 мм, висота – 30 мм, ширина – 35 мм. Така конструкція дозволяє обробляти деталі різної просторової форми. Магнітна індукція може регульовано варіюватись в межах 0,02 – 0,5 Тл. Верстат дозволяє обертання головного шпинделя в діапазоні 0 – 800 об/хв з можливістю плавного регулювання [6, 16].

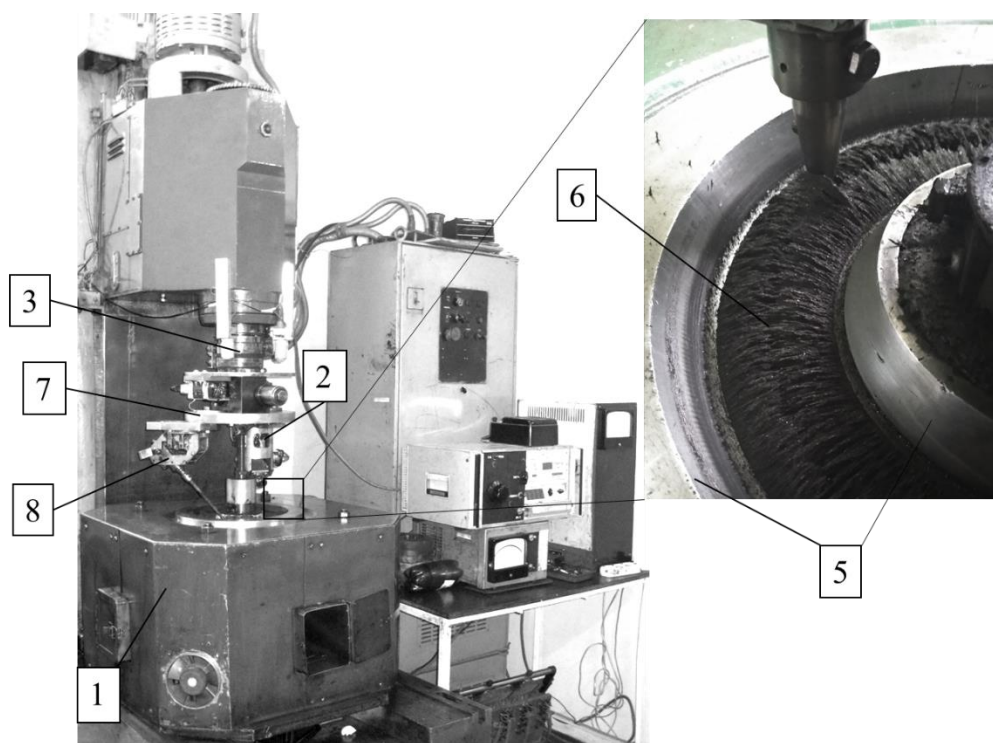


Рисунок 2.1 – Експериментальна установка

Для оброблення дослідних зразків та інших виробів, використовується універсальна головка, яка встановлюється в головному шпинделі таким чином, щоб її вертикальна вісь співпадала з віссю магнітної системи, і представляє собою плиту (7) з якою з'єднується пристрій з мінішпинделем, в якому закріплена оправка з деталлю. Оправка може обертатися навколо осі мінішпинделя, який з'єднаний з двигуном постійного струму через редуктор, які забезпечують можливість обертання деталі з реверсом навколо власної осі з регульованою швидкістю обертання в діапазоні 0 - 1000 об/хв. Крім того на протилежній стороні плити розташовується другий мінішпиндель (8) спрощеної конструкції без можливості обертання та з можливістю керованого повороту. Цей шпиндель застосовується для розміщення на ньому додаткового формоутворюючого елемента МАІ. Основний та додатковий шпинделі можуть розташовуватися під різними кутами по відношенню до середньої лінії кільцевої ванни [6, 16].

При МАО оброблювана деталь, закріплена на оправці, може обертатися навколо осі кільцевої ванни та навколо власної осі. Обробку можливо

виконувати при режимах «стікання» або «натікання» (рис. 2.2), феромагнітного середовища на поверхню деталі [6, 16]. Відновлювальний стержневий елемент (ВСЕ) використовується для відновлення форми і робочих властивостей МАІ в робочій зоні після того як деталь витискає порошок з зазору. ВСЕ встановлюється у протилежному до деталі напрямку [6, 7, 16, 18, 24].

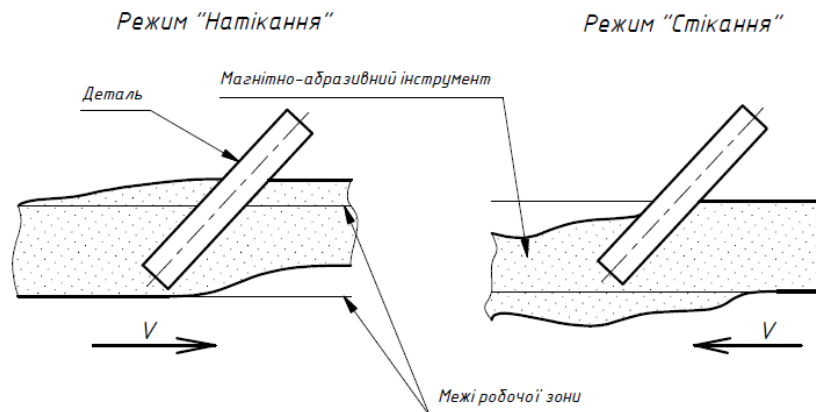


Рисунок 2.2 – Схеми розташування деталей при МАО в кільцевому робочому зазорі

Для дослідження використовувались циліндричні зразки довжиною 30 мм та діаметром 16 мм (рис 2.3) з феромагнітних та парамагнітних матеріалів, таких як сталь, алюміній, титан та бронза [6, 8, 9].

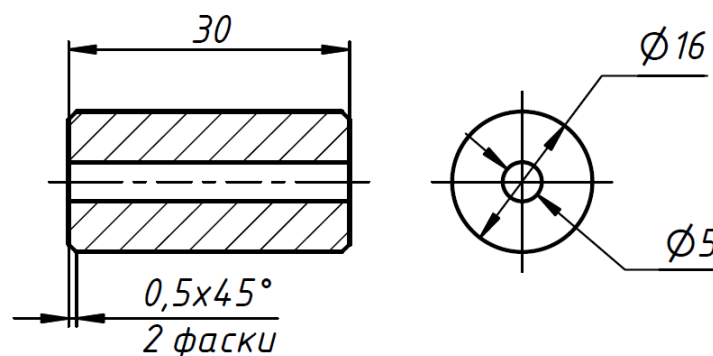
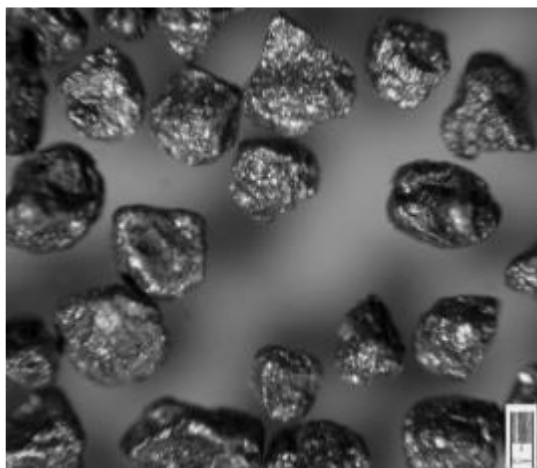


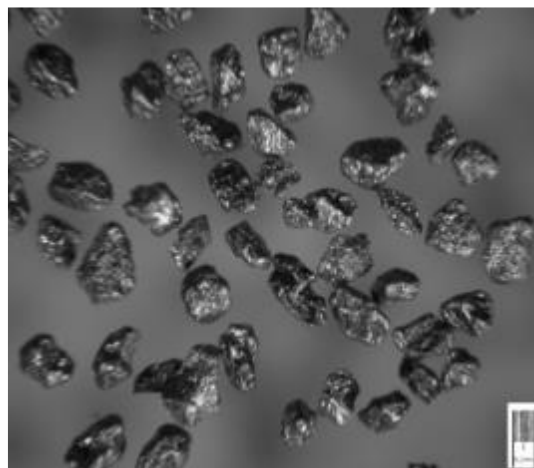
Рисунок 2.3 – Ескіз оброблюваних зразків

Зразки встановлювали в оправки закріплені на осі мінішпинделя універсальної головки 2 паралельно осі кільцевої ванни.

Для дослідження було використано порошок Поліам-Т з різними фракціями 400/315 та 200/100 мкм (рис. 2.4). Поліам-Т – порошок оскольчастої форми отриманий в результаті розмелення розплаву. Коефіцієнт нерівності складає 1,29 – 1,52 [16], тому Поліам-Т відносять до рівновісних порошоків.



Поліам-Т 400/315 мкм



Поліам-Т 200/100 мкм

Рисунок 2.4 – Вигляд оскольчастого порошку МАІ [16]

Додатково було проведено дослідження при використанні порошку іншої марки, а саме Поліам-М з фракціями 400/315 та 200/100 мкм (рис. 2.5). Порошок Поліам-М отриманий шляхом розпилення з розплавів, та має округлу форму. Цей порошок відноситься до нерівновісних оскільки коефіцієнт нерівності складає 1,79 – 2,07 [16].

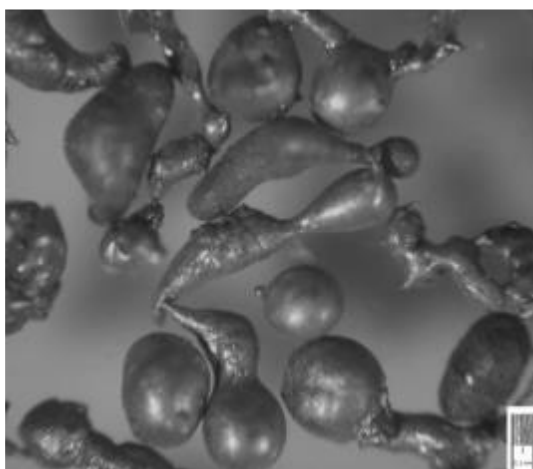


Рисунок 2.5 – Вигляд округлого порошку Поліам-М 400/315 мкм [16]

2.2 Обладнання для визначення сил взаємодії МАІ з оброблюваними поверхнями при МАО

Основною задачею дослідження було визначення сил тертя при обробленні зразків що безпосередньо впливає на величину крутного моменту двигуна мінішпинделя, що обертає деталь. Для оброблення деталей в умовах кільцевої ванни значний вплив на оброблення відіграє динамічний чинник [6, 8, 10, 16, 24]. Механічну взаємодію між порошком МАІ та поверхнею деталі можна поділити на дві складові: нормальну – тиск порошку на деталь та тангенціальну – безпосереднє тертя між МАІ та поверхнею деталі (рис. 1.9) [4, 6].

При дослідженні застосовується обладнання, що дозволяє вимірювати швидкість обертання шпинделя, деталі у мінішпинделі, силу струму та напругу що подаються на двигун. Для цього на головному шпинделі закріплено диск з магнітами та датчиком Хола що вимірює частоту обертання шпинделя. Для безпосереднього вимірювання швидкості обертання зразку, на корпусі шпинделя виконано блок на базі Arduino з безпроводним передавачем Bluetooth, що передається на табло (1) на рис. 2.6 [6]. Швидкість обертання деталі навколо власної осі може становити від 0 до 1000 об/хв, плавне регулювання забезпечується двигуном і черв'ячним редуктором на мінішпинделі [6, 16].

Для вимірювання навантажень на двигун мінішпинделя використовується джерело постійного струму, амперметр (2) та вольтметр (3).

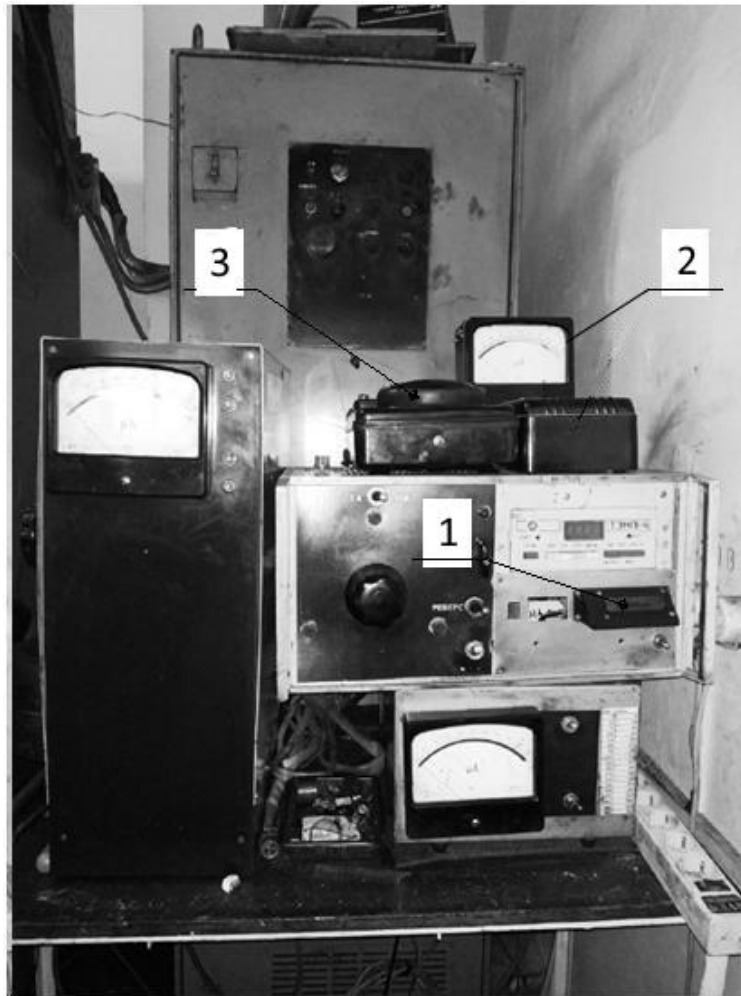


Рисунок 2.6 – Обладнання для вимірювання зусиль при МАО

2.3 Методика вимірювання сил при МАО опосередкованим методом

Методика вимірювання зусилля в процесі оброблення полягала у знаходженні крутного моменту на двигуні мінішпинделя. Методика полягала у визначенні ефективного моменту – $M_{\text{еф}}$, через вимірювання напруги U , сили струму A , швидкості обертання зразка навколо своєї осі ω , та опору двигуна r . Для цього спочатку було знайдено величину моменту опору двигуна шляхом вимірювання, при загальмованому якорі, спожитого двигуном струму (I) при відповідних значеннях напруги (U). Після цього проведено тарування двигуна для визначення моменту холостого ходу при обертанні зразка навколо власної осі та осі кільцевої ванни, за відсутності навантаження у вигляді МАІ [6, 16, 22].

Опір двигуна визначали при загальмованому якорі, послідовно вимірюючи величину спожитого двигуном струму, при різних значеннях напруги від джерела струму. Виміри виконувались декілька разів, після чого було знайдено залежність величини опору двигуна від напруги що подавалась на двигун за формулою (2.1) [6, 16].

$$r_{\text{дв}} = \frac{U_{\text{дв}}}{I_{\text{дв}}} \quad (2.1)$$

Результати дослідження зображені у таблиці 2.1, при малих значеннях напруги двигун має підвищене значення опору, при напрузі у 6 Вольт значення опору досягає 0,32 Ом та з подальшим збільшенням напруги, значення опору суттєво не змінюється.

Таблиця 2.1 – Результати вимірювання опору двигуна.

Напр, В	Сила струму, А	R _{дв} , Ом
3	8,08767988	0,370935
4	12,26036484	0,326255
5	15,47012251	0,323204
6	19,21483978	0,32

Ці значення було використано при подальших розрахунках. Графічно залежність представлена на рис. 2.7.

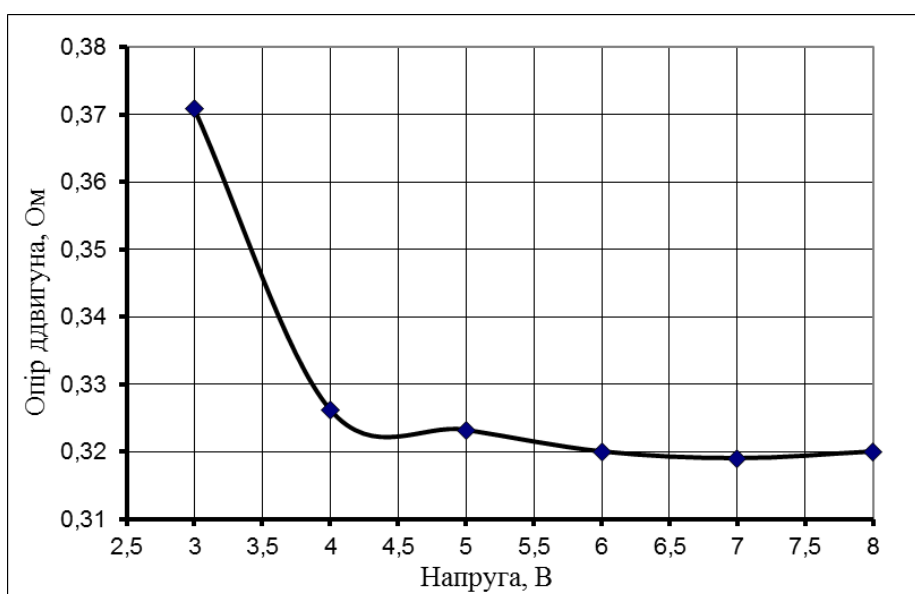


Рисунок 2.7 – Залежність опору двигуна від напруги

Тарування відбувалось при роботі верстата з обертанням зразка навколо своєї осі та навколо осі кільцевої ванни за відсутності МАП. Дослідження проводилось декілька разів для кожного значення напруги. Вимірювались сила струму та швидкість обертання зразка навколо своєї осі. Згідно формули (2.2) було виведено залежність моменту холостого ходу від значення напруги для кожного зразку [6, 16, 22].

$$M_{x.x.} = \frac{U_{xx} \cdot I_{xx} - I_{xx}^2 \cdot r_{дв.}}{\omega} \quad (2.2)$$

Де M_{xx} – момент холостого ходу, U_{xx} – напруга холостого ходу (В), I_{xx} – сила струму холостого ходу (А), $r_{дв.}$ – опір двигуна (Ом), ω – швидкість обертання зразка (об/хв). З отриманих значень для кожного зразка було виведено залежність моменту холостого ходу від швидкості обертання зразка навколо своєї осі (рис. 2.8). функція залежності була знайдена за допомогою апроксимуючої лінійної функції.

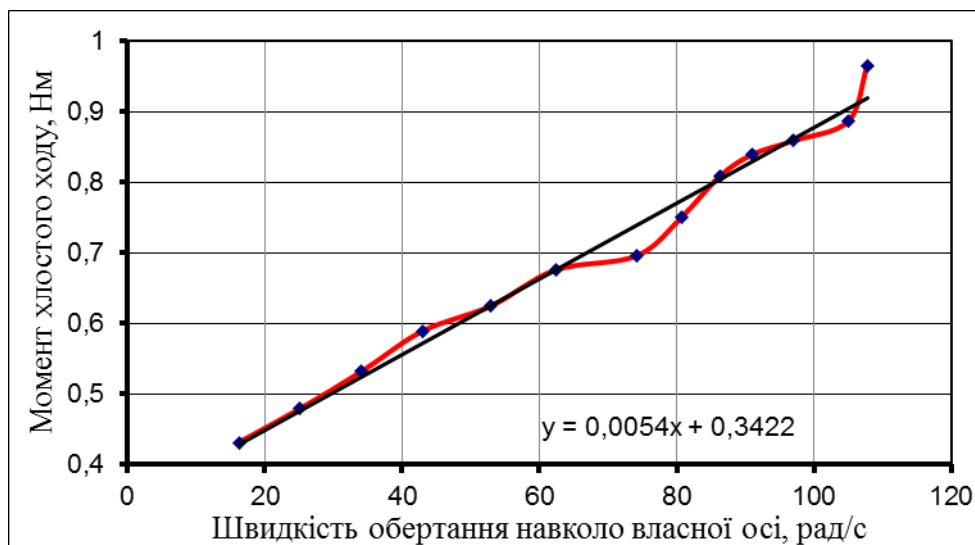


Рисунок 2.8 – Залежність моменту холостого ходу від швидкості обертання зразку на прикладі зразку з алюмінію.

Наступним етапом було знаходження крутного моменту на двигуні мінішпинделя шляхом вимірювання напруги, сили струму та швидкості обертання зразка при кільцевій ванні заповненій МАІ. Розрахунок вели за формулою (2.3)

$$M_{\text{дв}} = \frac{U_{\text{роб}} \cdot I_{\text{роб}} - I_{\text{роб}}^2 \cdot r_{\text{дв.}}}{\omega} \quad (2.3)$$

Де $M_{\text{дв}}$ – робочий момент, $U_{\text{роб}}$ – робоча напруга, $I_{\text{роб}}$ – робоча сила струму. Для знаходження дійсного моменту що виникає при обробленні необхідно виключити зусилля холостого ходу, що виникають внаслідок сил тертя в редукторі мінішпинделя, опору двигуна тощо. Тому зусилля визначалось за формулою (2.4) [6, 16, 22]. Момент холостого ходу виведений з апроксимуючої лінійної функції.

$$M_{\text{еф}} = M_{\text{дв}} - M_{\text{хх}} \quad (2.4)$$

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Визначення силової взаємодії шляхом знаходження крутного моменту на двигуні мінішпинделя.

3.1.1 Визначення моменту холостого ходу

В ході дослідження першим етапом проводилось тарування двигуна. Тарування проводилось на установці з вільною від порошку робочою зоною. При таруванні визначався момент холостого ходу на двигуні при обертанні зразку навколо своєї осі та навколо осі кільцевої ванни. Для дослідження використовували зразки зі сталі, алюмінію, бронзи та титану. Зразки встановлювались в мінішпинделі паралельно осі кільцевої ванни. Магнітна індукція коаксіальної системи складала 0,17 та 0,24 Тл. На двигун мінішпинделя подавали напругу від 3 до 15 В з кроком 1 В. Момент холостого ходу вираховували з вимірювань сили струму та швидкості обертання зразка за формулою (2.2). Для кожного матеріалу в подальшому використовували своє значення моменту холостого ходу. У дослідженні було виявлено, що момент холостого ходу при обробленні парамагнітних матеріалів не залежить від зміни магнітної індукції, натомість при обробленні феромагнітної сталі збільшення магнітної індукції сприяє незначному зростанню моменту.

3.1.2 Визначення ефективного моменту

Робочу зону було заповнено магнітно-абразивним порошком Поліам-Т зернистістю 400/315 мкм та 200/100 мкм. Зразки зі сталі, алюмінію, бронзи та титану розташовували в мінішпинделі паралельно до осі кільцевої ванни. Вимірювались сила струму та швидкість обертання зразка навколо власної осі, при кожному значенні напруги (3 – 15 В) що подавалась на двигун мінішпинделя. Дослідження проводились при швидкості обертання деталі навколо осі кільцевої ванни (швидкості переміщення в магнітному зазорі) 100 об/хв, 200 об/хв та 300 об/хв для кожного значення швидкості встановлювали

значення магнітної індукції системи що складала 0,17 та 0,24 Тл. При дослідженні використовувався немагнітний відновлювальний елемент (ВСЕ) що сприяє відновленню властивостей і форми МАІ в робочому зазорі. За отриманими результатами по формулам (2.3 та 2.4) було отримано значення ефективного крутного моменту на валу двигуна мінішпинделя.

3.1.3 Визначення дійсного моменту при обробленні

Дійсний момент при обробленні зразків був визначений в заповненій магнітно-абразивним порошком кільцевій ванні. На двигун мінішпинделя подавали напругу в діапазоні 3 – 15 В з кроком 1 В, вимірювались сила струму та швидкість обертання зразку навколо своєї осі при магнітній індукції 0,17 та 0,24 Тл. Для кожного значення індукції задавались значення швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни 100 об/хв, 200 об/хв, 300 об/хв. При обробленні використовували відновлювальний стержневий елемент (ВСЕ) для забезпечення відновлення МАІ на протязі усього циклу вимірювань. Дослідження проводились декілька разів при зростанні та спаданні напруги, далі з цих даних обчислювали середнє значення. Після статистичної обробки отриманих результатів розраховували значення дійсного моменту за формулою 2.3. Характерний вигляд отриманих результатів у вигляді залежностей зміни дійсного моменту від швидкості обертання зразків навколо власної осі при різних швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни верстата наведено на рис. 3.1

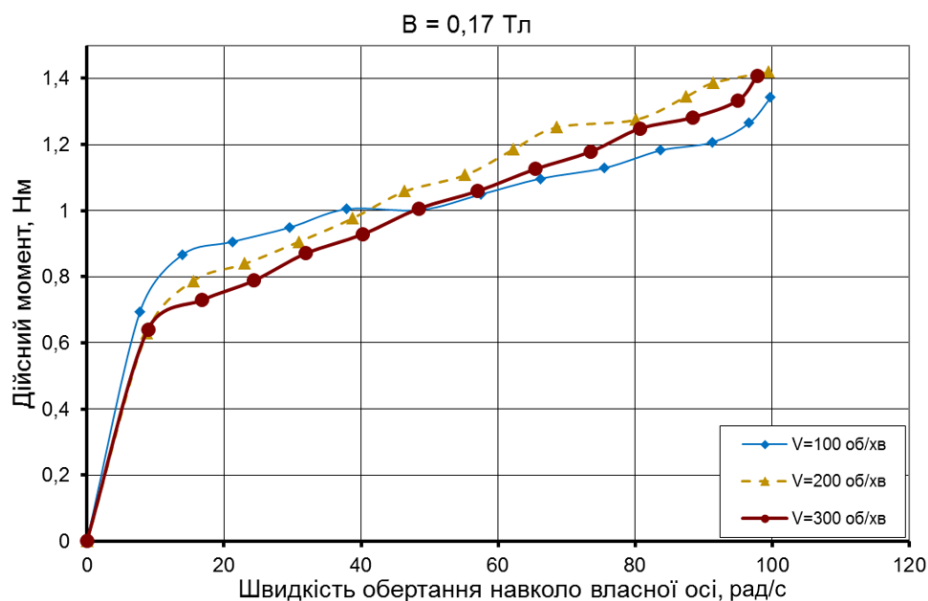


Рисунок 3.1 – Зміна величини дійсного моменту при обробленні сплаву алюмінію Д-16 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл, порошком Полімам-Т (400/315)

Для знаходження ефективного моменту з використанням розрахованих значень дійсного моменту і значення моменту холостого ходу було використано формулу (2.4).

Подальші дослідження виконували при використанні циліндричних зразків (рис. 2.3), виготовлених з феромагнітної сталі 40Х13 і парамагнітних сплавів: алюмінію –Д16, бронзи - БрАЖ і титану - ВТЗ-1.

3.1.4 Визначення ефективного моменту при обробленні зразків зі сплаву алюмінію Д-16 оскольчастим порошком Полімам-Т

Результати дослідження при використанні зразку з алюмінію та порошку з фракцією 400/315 мкм показані на рис. 3.2 Для кожного значення магнітної індукції 0,17 та 0,24 Тл проводились дослідження з швидкостями обертання навколо власної осі 100 об/хв, 200 об/хв, та 300 об/хв.

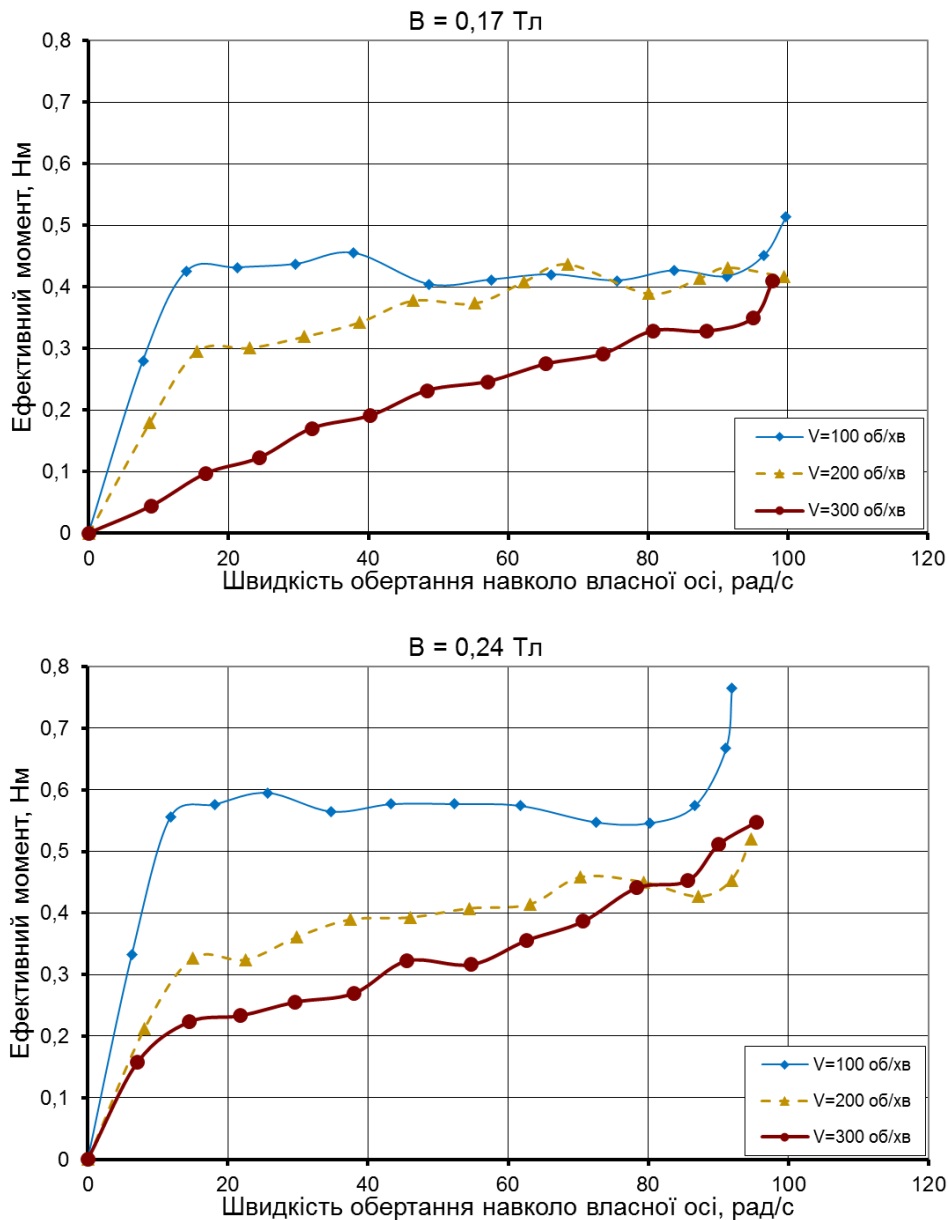


Рисунок 3.2 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву алюмінію Д-16 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл та 0,24 Тл, порошком Полімам-Т (400/315)

На графіках показано, що зі збільшенням величини магнітної індукції збільшується величина ефективного моменту, особливо при швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни 100 об/хв. Це пов'язано з початком переформування МАП під дією динамічних чинників процесу, магнітного поля і формуванням квазістабільного магнітно-абразивного інструменту

(МАІ). При цьому відбувається збільшення щільності і жорсткості МАІ. Встановлено, що зміна швидкості обертання має більший вплив ніж зміна магнітної індукції.

Фактично, при цьому дослідженні значення ефективного моменту безпосередньо по'язані з силами тертя між поверхнею деталі та магнітно-абразивним інструментом. При збільшенні швидкості обертання спостерігається зменшення величини ефективного моменту. Це може бути викликано зменшенням площі фактичного контакту МАІ з оброблюваною поверхнею [15].

Отримані залежності можна умовно поділити на три зони в залежності від частоти обертання зразків навколо власної осі: зона 1 – частота обертання 0-(12-15) рад/с, зона (2–15) – 80 рад/с і зона 3 – більше 80 рад/с. Для зони 1 характерний різке зростання ефективного моменту. В зоні 2, при швидкостях обертання навколо осі ванни 100 та 200 об/хв, зміна швидкості обертання деталі навколо своєї осі суттєво не впливає на ефективний момент. Значення ефективного моменту в 1 та 2 зонах можуть пояснюватися зміною характеру дії складових сил взаємодії (зона 1 – зростання тангенціальної складової, зона 2 – стабільна тангенціальна складова). На швидкостях обертання деталі навколо власної осі 80 – 90 рад/с (зона 3) спостерігається різке підвищення ефективного моменту, таке явище зумовлене зміною характеру взаємодії МАІ з поверхнею оброблюваного зразка шляхом зміни кутів різання зерен МАІ, а саме зміни процесу різання і скобління окремими групами зерен оброблюваної поверхні на процес вигладжування з переважним пластичним деформуванням поверхневого шару [2, 4, 8, 11], що відбувається в результаті активного провертання частинок магнітно-абразивного порошку, які безпосередньо контактують з поверхнею, що оброблюється.

На рис. 3.3 зображено результати дослідження при обробленні алюмінієвого зразку порошком Полімам-Т з фракцією 200/100 мкм.

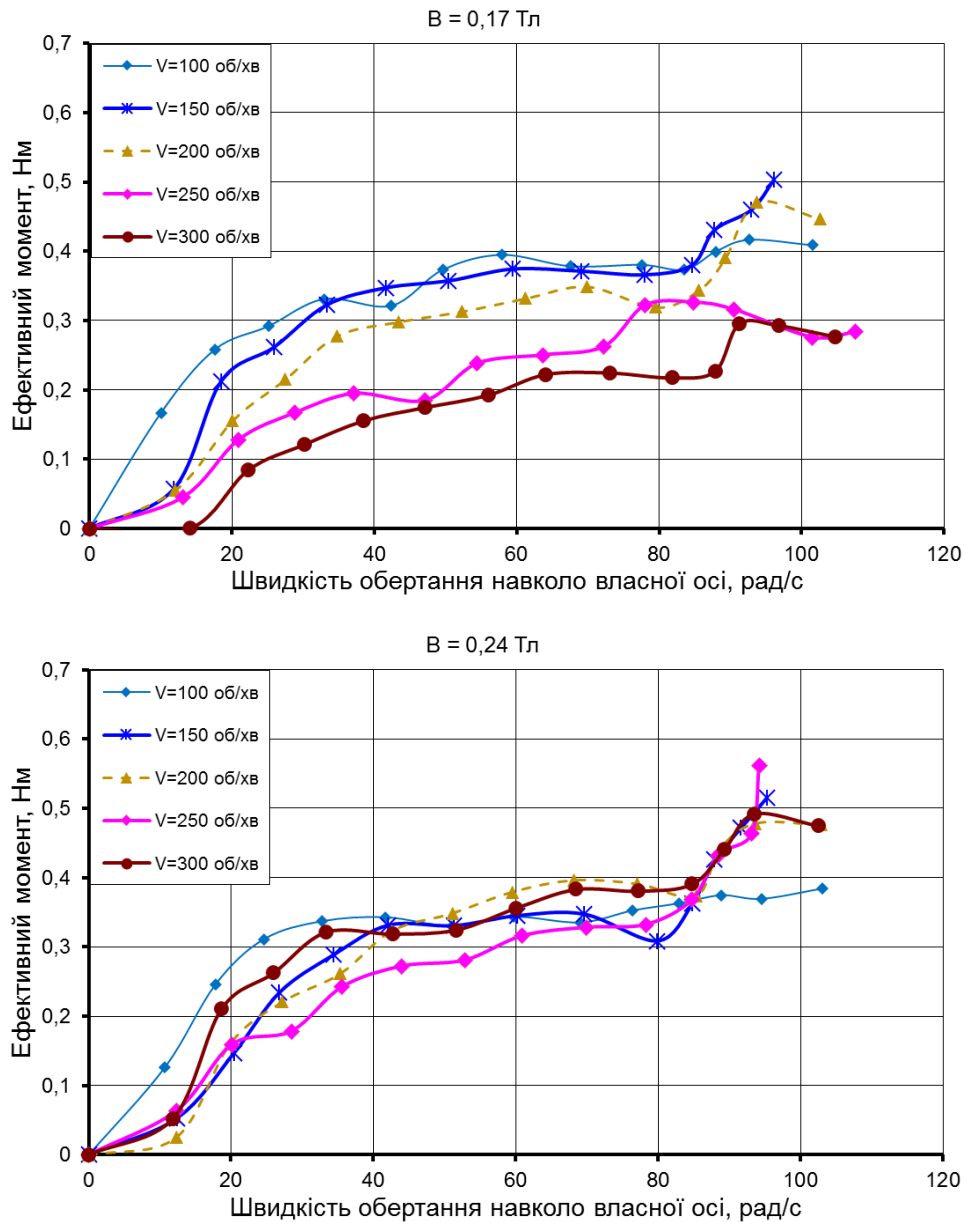


Рисунок 3.3 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву алюмінію Д-16 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл та 0,24 Тл, порошком Полімам-Т (200/100)

Показано, що при обробленні порошком з меншою фракцією - 200/100 мкм виникають аномальні зміни значень ефективного моменту у порівнянні з попередніми результатами при МАО порошком з розміром частинок 400/315 мкм. Тому було проведено додаткові досліді при швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни 150 об/хв та 250 об/хв. При магнітній індукції 0,17

Тл можна чітко побачити зменшення ефективного моменту при збільшенні швидкості. На швидкостях обертання зразка навколо своєї осі 80 – 90 рад/с присутній різке зростання ефективного моменту. При обробленні з магнітною індукцією 0,24 Тл зміна швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни не має суттєвого впливу на ефективний момент. На швидкостях обертання зразку навколо власної осі менше 20 – 30 рад/с відбувається різке зростання ефективного моменту пов'язане зі зміною характеру взаємодії між зразком і МАІ, а саме, збільшенням сил тертя на поверхні деталі за рахунок зменшення нормальної складової тиску порошку на деталь.

Для наглядного представлення залежності ефективного моменту від зміни швидкостей обертання навколо осі кільцевої ванни та зміни швидкості обертання зразку навколо власної осі, було побудовано тривимірні поверхні зміни ефективного моменту від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни. Для цього було використане програмне забезпечення Surfer (рис 3.4).

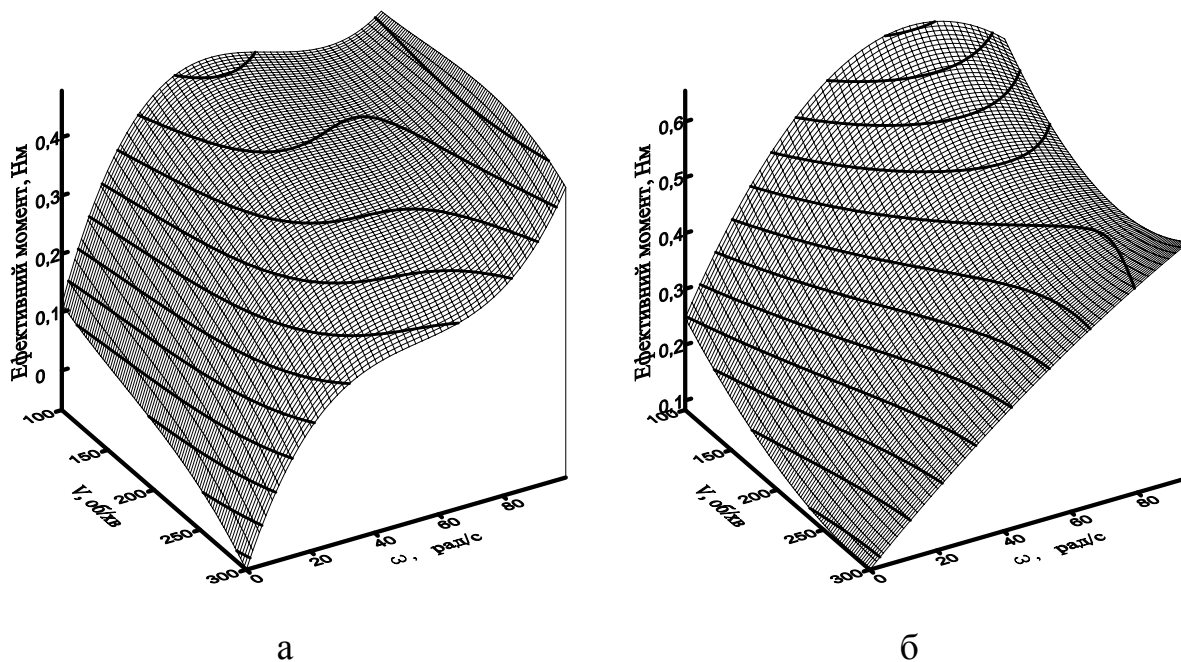


Рисунок 3.4 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву алюмінію Д-16 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл (а) та 0,24 Тл (б), порошком Полімам-Т (400/315)

На рис. 3.4 показано, що при обробленні алюмінію Д-16 при застосуванні порошку Полімам-Т 400/315 з магнітною індукцією 0,17 Тл, найбільші зусилля спостерігаються при швидкості обертання зразку навколо своєї осі більше 40-60 рад/с. При магнітній індукції 0,24 Тл найбільший ефективний момент зміщується в зону більш високих частот обертання навколо власної осі – 60 - 85 рад/с, а найбільший вплив має зміна швидкості переміщення в робочому зазорі. Це можна пояснити підвищення жорсткості МАІ при підвищенні магнітної індукції в робочому зазорі і зменшенням рухливості зерен в квазістабільних формуваннях в МАІ [15]. Встановлено, що оптимальні значення ефективного моменту в зоні 2 присутні в діапазоні: швидкість обертання навколо осі кільцевої ванни 100 – 150 об/хв, швидкість навколо своєї осі 40 – 80 рад/с. При таких технологічних умовах процес оброблення найбільш ефективний.

При обробленні алюмінію порошком з фракцією 200/100 для магнітної індукції 0,17 Тл (рис. 3.5) показано, що обидві складові практично однаково впливають на значення ефективного моменту.

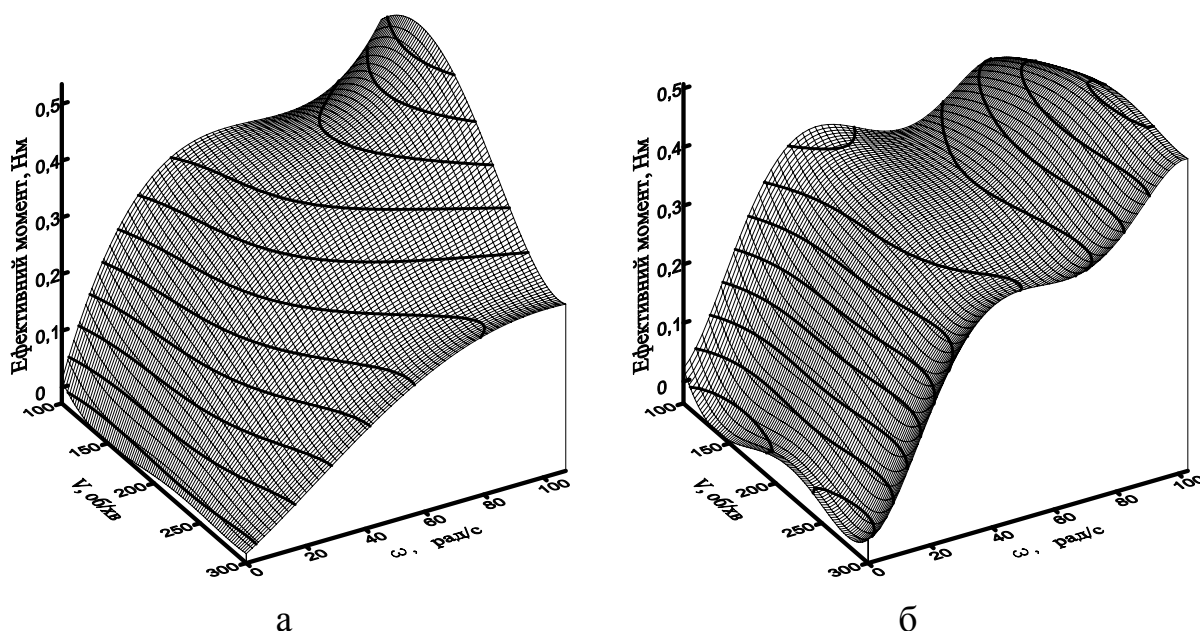


Рисунок 3.5 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву алюмінію Д-16 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл (а) та 0,24 Тл (б), порошком Полімам-Т (200/100)

Для магнітної індукції 0,24 Тл характерною є зміна ефективного моменту тільки від зміни швидкості обертання зразка навколо власної осі. Такі результати пояснюються змінами характеру силової взаємодії зі змінами технологічних параметрів, таких як величина магнітної індукції та розмір зерен порошку. Встановлено, що при обробленні магнітно-абразивним порошком Полімам-Т з зернистістю 200/100 мкм оптимальні значення ефективного моменту присутні в діапазоні: швидкість обертання навколо осі кільцевої ванни 100 – 150 об/хв, швидкість навколо своєї осі 30 – 70 рад/с.

Необхідно відзначити, що максимальні значення ефективного моменту притаманні другій зоні розташовані практично в одному діапазоні частот обертання навколо власної осі і несуттєво різняться для магнітних індукцій 0,17 і 0,24 Тл. Причому швидкість обертання навколо осі кільцевої ванни впливає на величину ефективного моменту в досліджуваних діапазонах несуттєво.

3.1.5 Визначення ефективного моменту при обробленні зразків зі сплаву алюмінію Д-16 округлим порошком Полімам-М

Результати досліджень при обробленні зразків зі сплаву алюмінію Д-16 сферичним порошком Полімам-М (400/315 мкм) показані на рис.3.6. Дослідження проводились з магнітною індукцією 0,17 та 0,24 Тл, для кожної магнітної індукції було задано швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни 100 об/хв, 200 об/хв, 250 об/хв, 300 об/хв.

Показано, що оброблення округлим порошком на відміну від осколькочастого спричиняє зміну характеру взаємодії між зразком та МАІ. При обробленні порошком сферичного типу, переважає вигладжування матеріалу деталі. Поворот зерен порошку не спричиняє значного впливу на характер оброблення. На графіках показано, що зростання швидкостей обертання навколо осі кільцевої ванни та навколо своєї осі призводить до збільшення величини ефективного моменту. Це пояснюється тим, що з порошку Полімам-М при обробленні формується квазістабільний

конгломерат –представницький об’єм з 5-6 зерен порошку, який має більшу площу дотику до поверхні деталі [15].

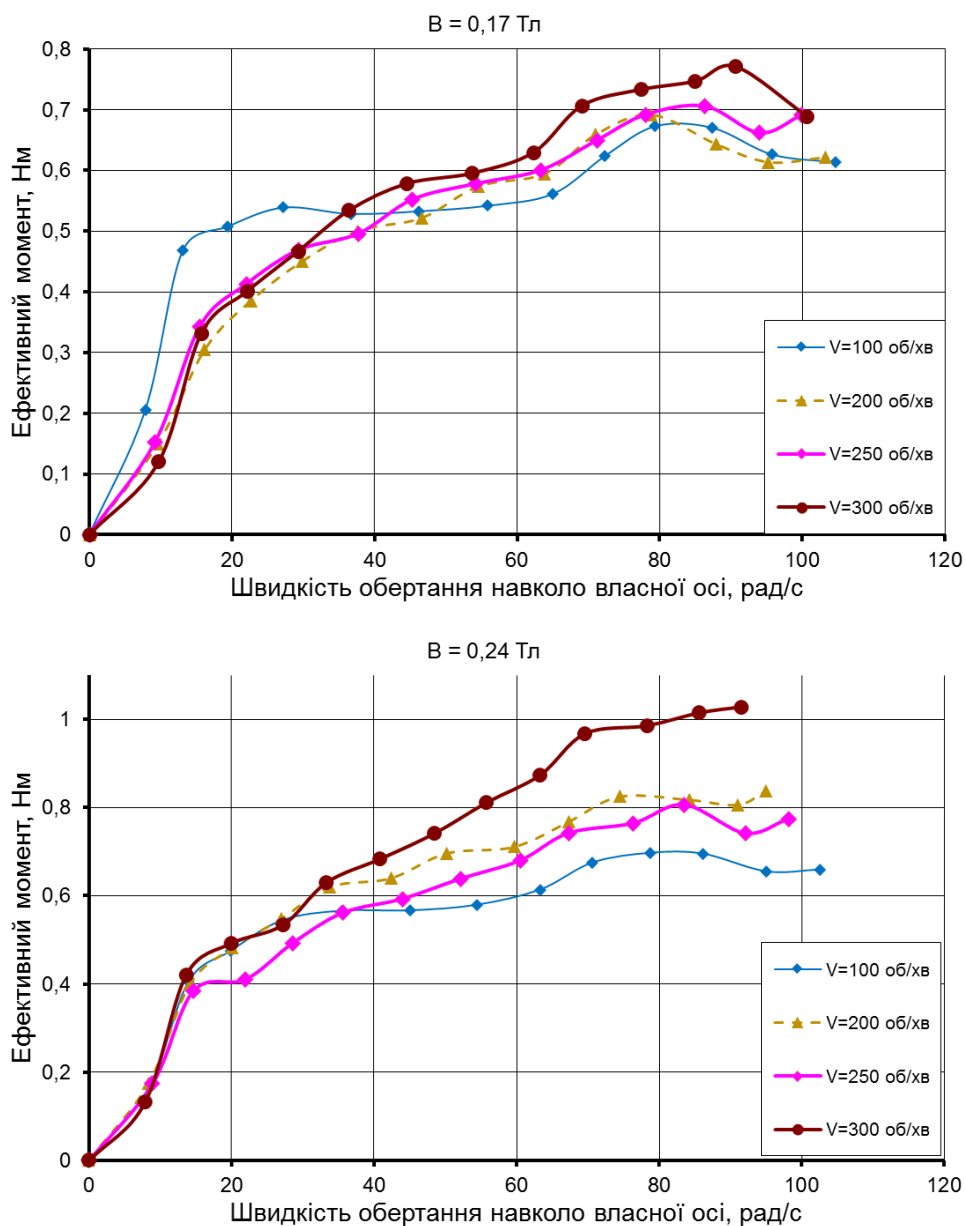


Рисунок 3.6 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву алюмінію Д-16 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл та 0,24 Тл, порошком Полімам-М (400/315)

Оновлення активних зерен порошку в такому конгломераті також потребує затрати значної кількості енергії. Високі значення ефективного моменту у порівнянні з оскольчастим порошком Помімам-Т можуть

пояснюватись більшою щільністю МАІ з округлого порошку Полімам-М. Збільшення величини магнітної індукції супроводжується збільшенням ефективного моменту.

На відміну від осколькогастого порошку, при обробленні округлого МАІ залежність ефективного моменту від швидкостей обертання зразку навколо своєї осі та осі кільцевої ванни можна поділити на 2 зони. 1 зона (0 – 15 рад/с) представляє собою різке підвищення моменту викликане зростанням тангенціальної складової сили взаємодії. Показано, що в зоні 2 (більше 15 рад/с) характерне поступове зростання ефективного моменту при зростанні швидкості обертання навколо своєї осі.

На графіках поверхонь (рис. 3.7) показано, що максимальний ефективний момент при обробленні зразків з алюмінію порошком Полімам-М (400/315 мкм) досягається при високих значеннях швидкостей обертання навколо осі кільцевої ванни та власної осі.

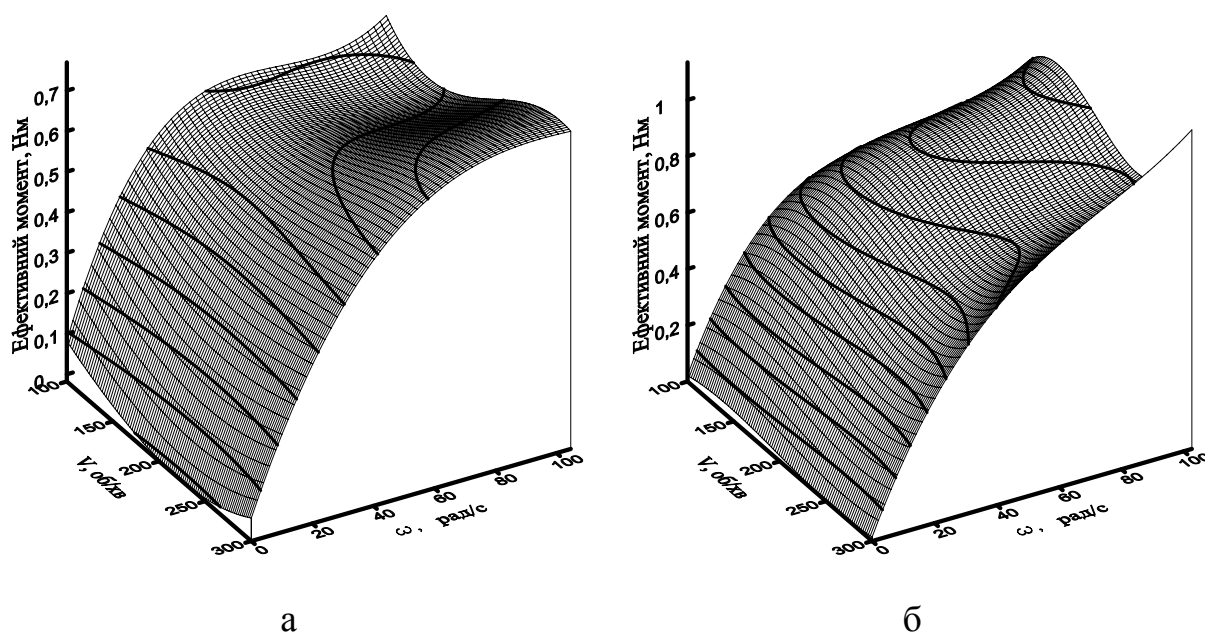


Рисунок 3.7 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву алюмінію Д-16 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл (а) та 0,24 Тл (б), порошком Полімам-М (400/315)

Аномальні зростання і спадання моменту на графіках зумовлене зміною характеру оброблення (зміною складових сил взаємодії) при зміні швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни. Встановлено, що оптимальні значення ефективного моменту при обробленні досягаються в діапазоні: швидкість обертання навколо осі кільцевої ванни 150 об/хв; швидкість обертання навколо своєї осі 60 – 90 рад/с; магнітна індукція 0,24 Тл.

3.1.6 Визначення ефективного моменту при обробленні сплаву титану ВТ-8 оскольчастим порошком Полімам-Т

На рис. 3.8 показані результати досліджень при обробленні титанового сплаву ВТ-8 порошком Полімам-Т з зернистістю 400/315 мкм. Дослідження проводилось з магнітною індукцією 0,17 та 0,24 Тл та на швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни 100 об/хв, 200 об/хв, 300 об/хв.

На графіках показано, що при обробленні титану, величина магнітної індукції несуттєво впливає на значення ефективного моменту, оскільки при великому магнітному зазорі нівелюється вплив магнітної індукції на оброблення. При збільшенні швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни ефективний момент оброблення зменшується. Це зумовлено зміною характеру сил взаємодії з нормального тиску на сили тертя між поверхнею зразку та магнітно абразивним порошком.

Аналогічно з обробленням алюмінію, залежності можна умовно поділити на 3 зони. Різке зростання моменту (зона 1) присутнє при швидкості обертання деталі навколо власної осі менше 15 рад/с. Для зони 2 (15 – 70 рад/с) характерний слабкий вплив зміни швидкості обертання зразку навколо власної осі на значення ефективного моменту. Для зони 3 на швидкості обертання навколо своєї осі більше 70 рад/с спостерігається стрибок ефективного моменту, після 80 рад/с, наявне незначне падіння моменту. Це явище можна пояснити поворотом зерен та зміною їх кутів різання і можливим руйнуванням квазістабільних утворень в МАІ з одночасним зростанням адгезійної складової.

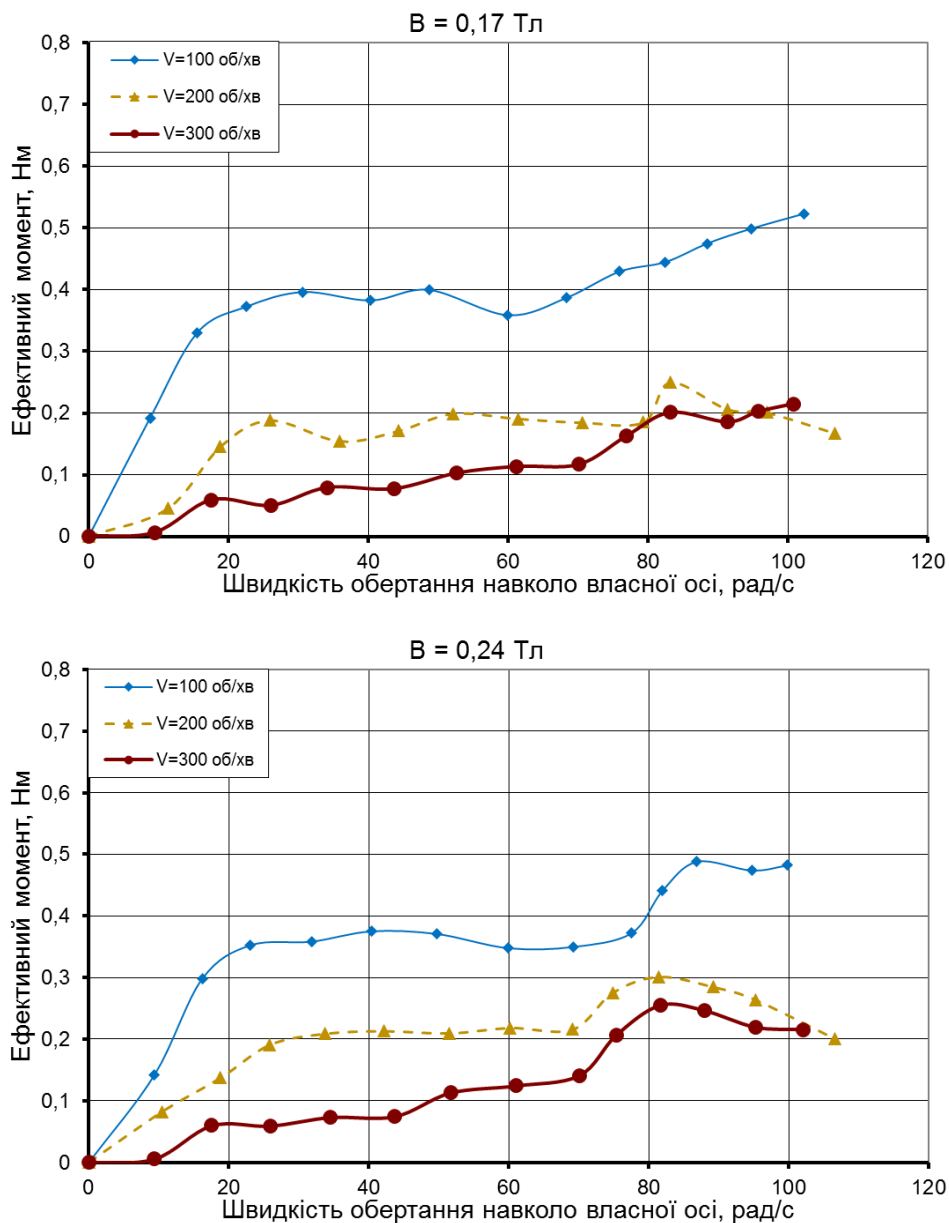


Рисунок 3.8 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву титану ВТ-8 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл та 0,24 Тл, порошком Полімам-Т (400/315)

Зростання ефективного моменту при частотах обертання зразків в діапазоні 75- 85 рад/с і подальше зниження при частотах більших 85 – 90 рад/с можна пояснити співвідношеннями сил від адгезійної взаємодії між МАІ і матеріалом деталі і сил, що виникають в результаті динамічної взаємодії, що призводять до псевдозрідження МАІ, руйнування квазістабільних утворень в

комплексі з пондеромоторними силами [10]. Це явище вірогідно впливає на механізм оброблення, а саме на процес зміни переважного скобління на вигладжування.

При обробленні титанового сплаву ВТ-8 магнітно-абразивним порошком Полімам-Т з фракцією 200/100 (рис. 3.9) спостерігається невелике зростання ефективного моменту при зростанні величини магнітної індукції.

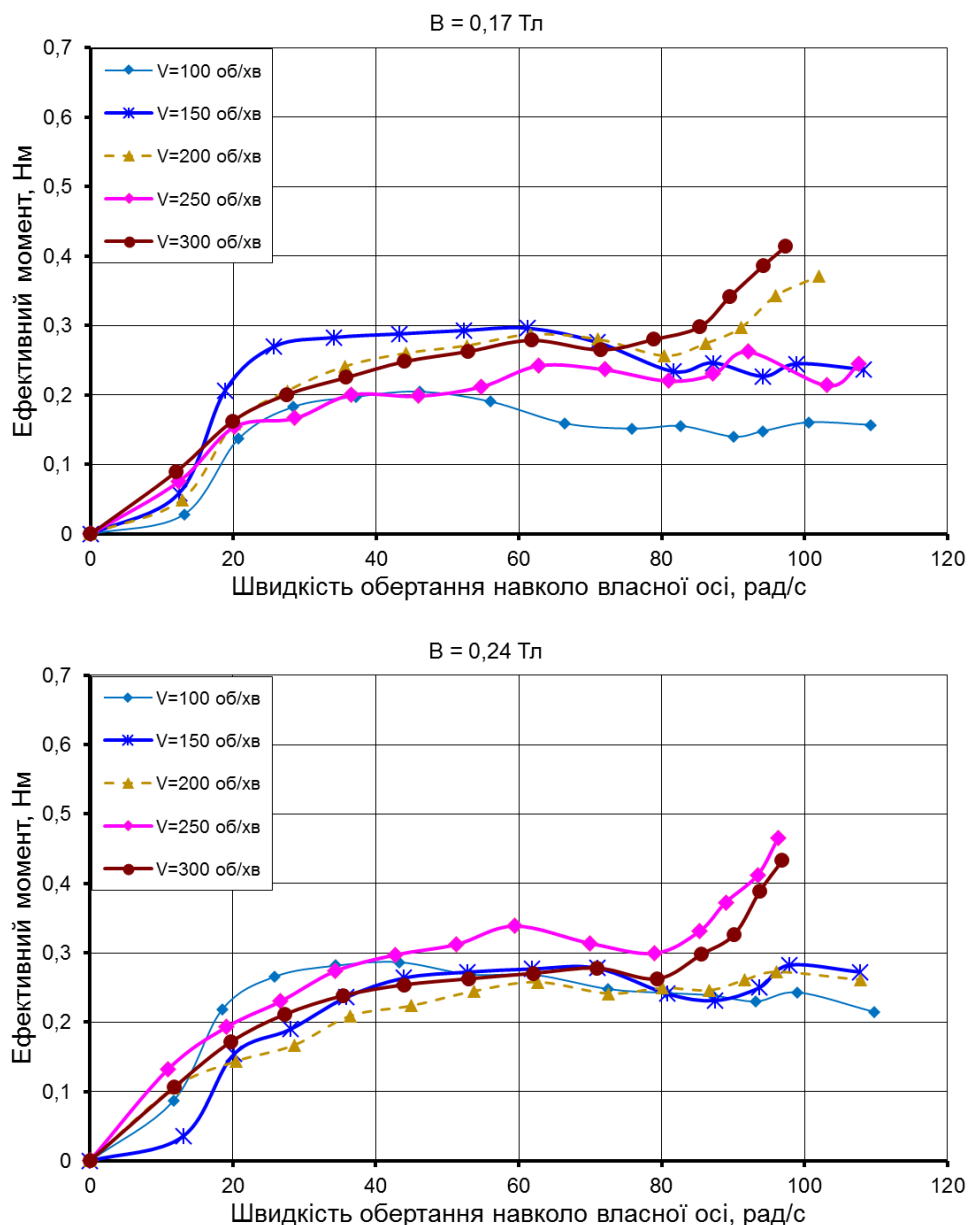


Рисунок 3.9 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву титану ВТ-8 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл та 0,24 Тл, порошком Полімам-Т (200/100)

Зміна швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни не має суттєвого впливу на величину ефективного моменту. Показано, що залежність можна умовно розділити на 3 зони: 1 зона - швидкість обертання навколо зразку навколо своєї осі 0 – 20 рад/с, 2 зона – 20 – 80 рад/с, зона 3 – більше 80 рад/с. У зоні 3 при високих швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни (200 – 300 об/хв) спостерігається різкий стрибок ефективного моменту. Це пояснюється поворотом зерен зі зміною їх кутів різання [11].

При МАО порошком дрібним порошком у порівнянні з обробкою порошком з розміром частинок 400/315 мкм зміна механізму різання не супроводжується явною, характерною зміною величини ефективного моменту - $M_{\text{еф}}$. В цьому випадку при швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни більших за 250 об/хв. має місце зростання $M_{\text{еф}}$

На поверхневих графіках при обробленні порошком з більшою фракцією (рис. 3.10) можна спостерігати, що максимальні значення ефективного моменту спостерігаються при високих швидкостях обертання зразку навколо власної осі та низьких швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни. Це пояснюється переходом силової взаємодії від нормальної складової (що задається рухом зразку в робочому зазорі навколо осі кільцевої ванни) до тангенціальної (обертання зразку навколо своєї осі) Ці два параметри в рівній мірі впливають на ефективний момент.

При обробленні порошком з меншою фракцією (200/100 мкм) максимум ефективного моменту спостерігається при високих швидкостях обертання зразку навколо власної осі та низьких швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни. При зміні швидкості руху зразку в робочому зазорі спостерігаються аномальні зростання ефективного моменту, що викликані поворотом зерен МАІ відносно поверхні деталі з зміною кутів різання зерен та зміною характеру різання.

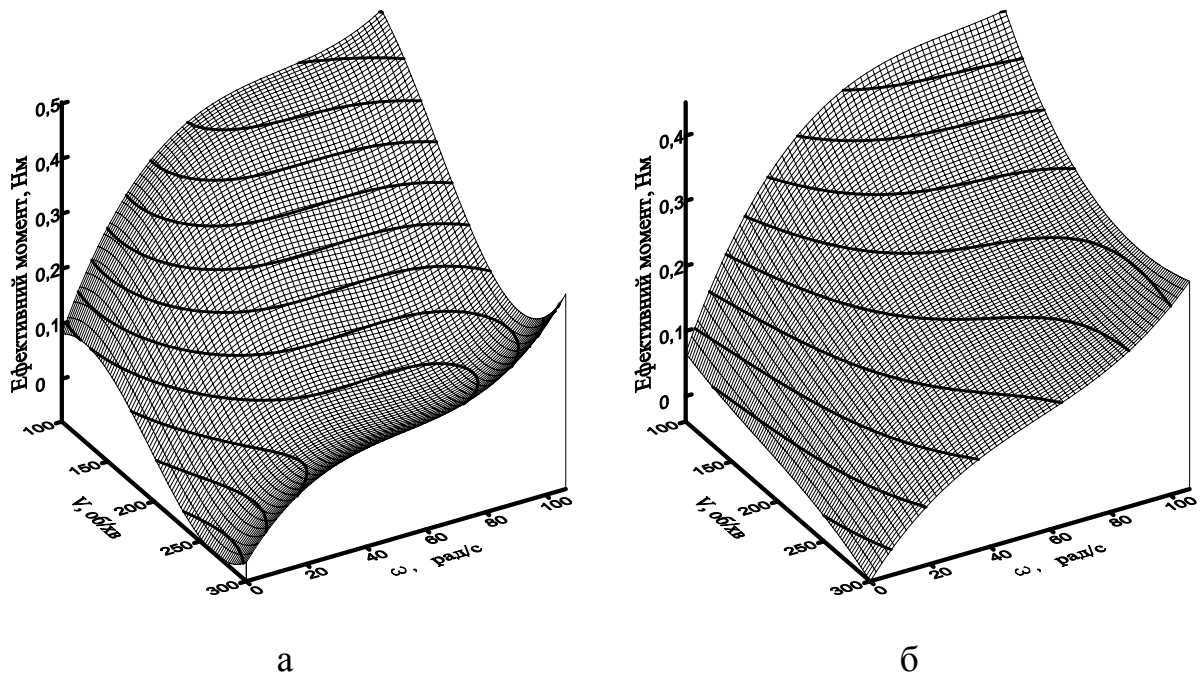


Рисунок 3.10 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву титану ВТ-8 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл (а) та 0,24 Тл (б), порошком Полімам-Т (400/315)

При обробленні сплаву титану ВТ-8 порошком зернистістю 200/100мкм (рис. 3.11), спостерігаються аномальні зростання ефективного моменту при зміні швидкостей обертання зразку навколо осі кільцевої ванни та навколо власної осі. Це зумовлено переорієнтацією зерен, зміною їх кутів різання зі зміною характеру оброблення. Встановлено, що оптимальні значення ефективного моменту при магнітній індукції 0,17 Тл знаходяться в межах 150 – 200 об/хв, та 40 – 80 с^{-1} навколо власної осі. При магнітній індукції 0,24 Тл – 250 – 300 об/хв навколо осі кільцевої ванни та 40 – 80 с^{-1} навколо власної осі.

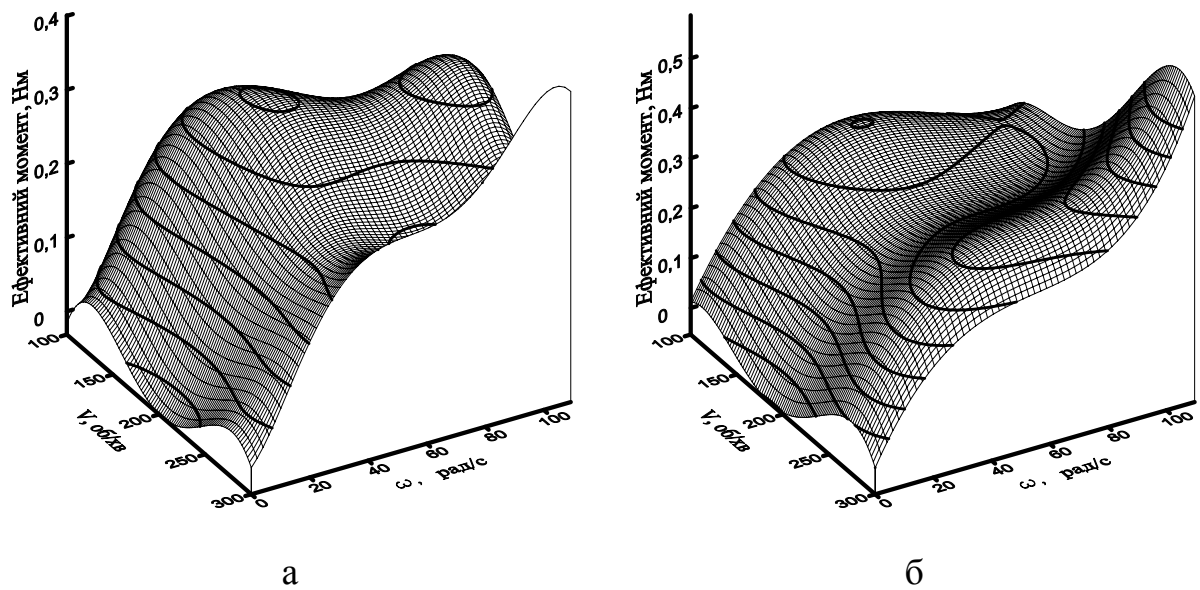


Рисунок 3.11 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву титану ВТ-8 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл (а) та 0,24 Тл (б), порошком Полімам-Т (200/100)

3.1.7 Визначення ефективного моменту при обробленні сплаву титану ВТ-8 округлим порошком Полімам-М

Результати досліджень при обробленні сплаву титану ВТ-8 округлим магнітно-абразивним порошком Полімам-М з зернистістю 400/315 мкм наведені на рис. 3.12 Для кожного значення магнітної індукції 0,17 Тл та 0,24 Тл проводились дослідження на швидкостях обертання зразку навколо осі кільцевої ванни 100 об/хв, 150 об/хв, 200 об/хв, 250 об/хв, 300 об/хв.

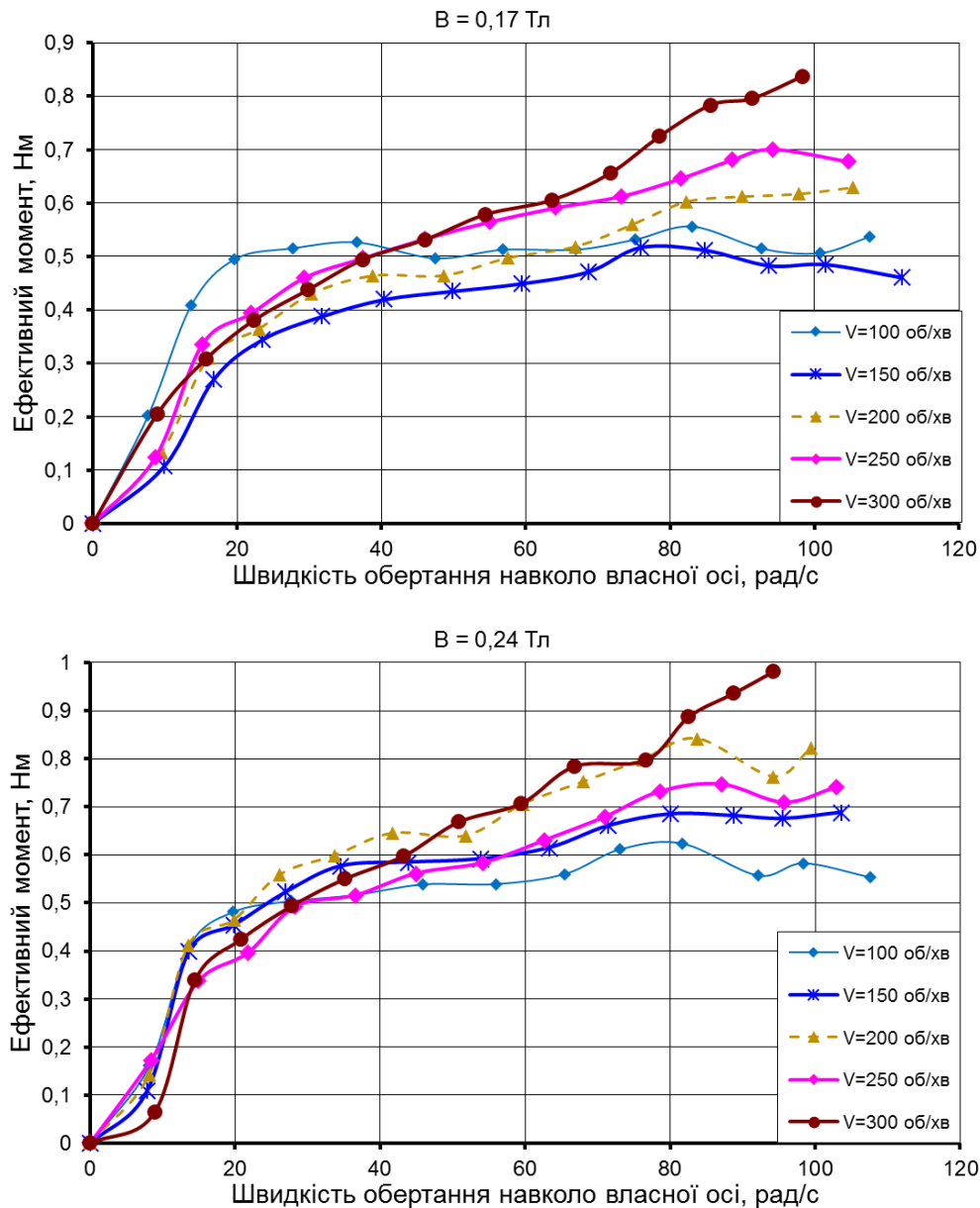


Рисунок 3.12 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву титану VT-8 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл та 0,24 Тл, порошком Полімам-М (400/315)

Показано, що при обробленні сплаву титану порошком з округлими зернами, змінюється характер взаємодії між деталлю та магнітно-абразивним інструментом. Це проявляється в збільшенні значень ефективного моменту при збільшенні швидкості обертання зразку навколо осі кільцевої ванни. Це може пояснити збільшеною площею дотику між деталлю та порошком [15] (у

порівнянні з порошком Полімам-Т), що веде за собою збільшення впливу тертя при різних величинах швидкості руху зразку в робочій зоні. Таке збільшення тертя веде за собою відповідне збільшення ефективного моменту. Збільшення магнітної індукції призводить до збільшення ефективного моменту. Залежність можна умовно поділити на 2 зони. Зона 1 (швидкість обертання навколо своєї осі 0 – 15 рад/с) характеризується значним зростанням ефективного моменту, зона 2 (більше 15 рад/с) – поступове зростання моменту. Це пояснюється зміною складових сил взаємодії.

На рис. 3.13 показано, що при обробленні сплаву титану ВТ-8 порошком Полімам-М (400/315 мкм) максимальні значення ефективного моменту досягаються при високих значеннях швидкостей обертання зразку навколо своєї осі, осі кільцевої ванни та високих значеннях магнітної індукції. Це пояснюється збільшенням сил тертя при збільшенні цих параметрів.

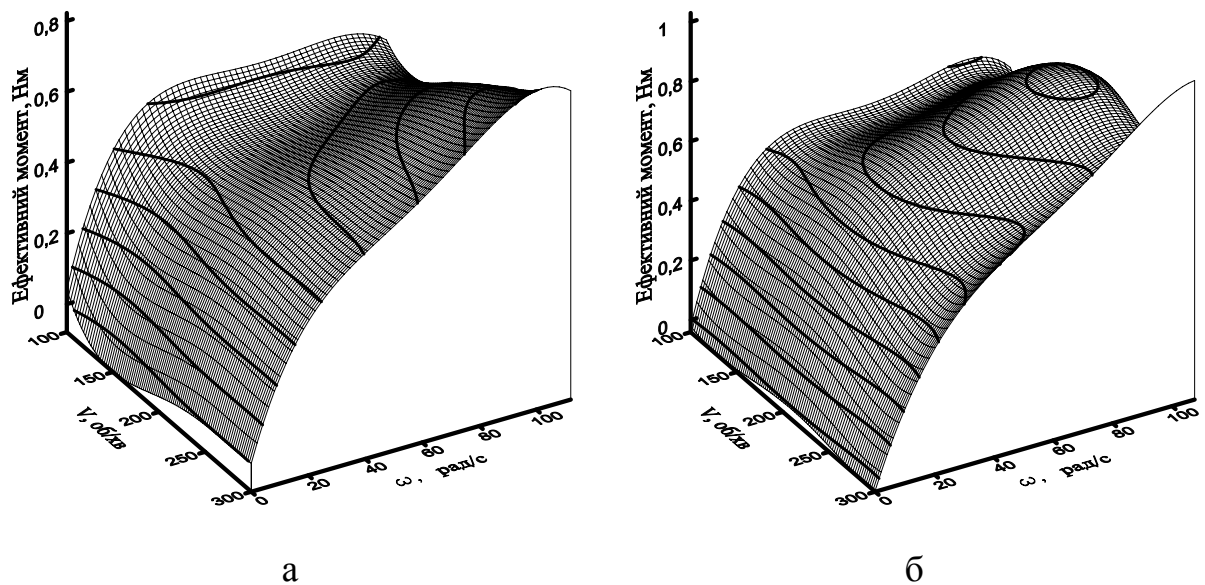


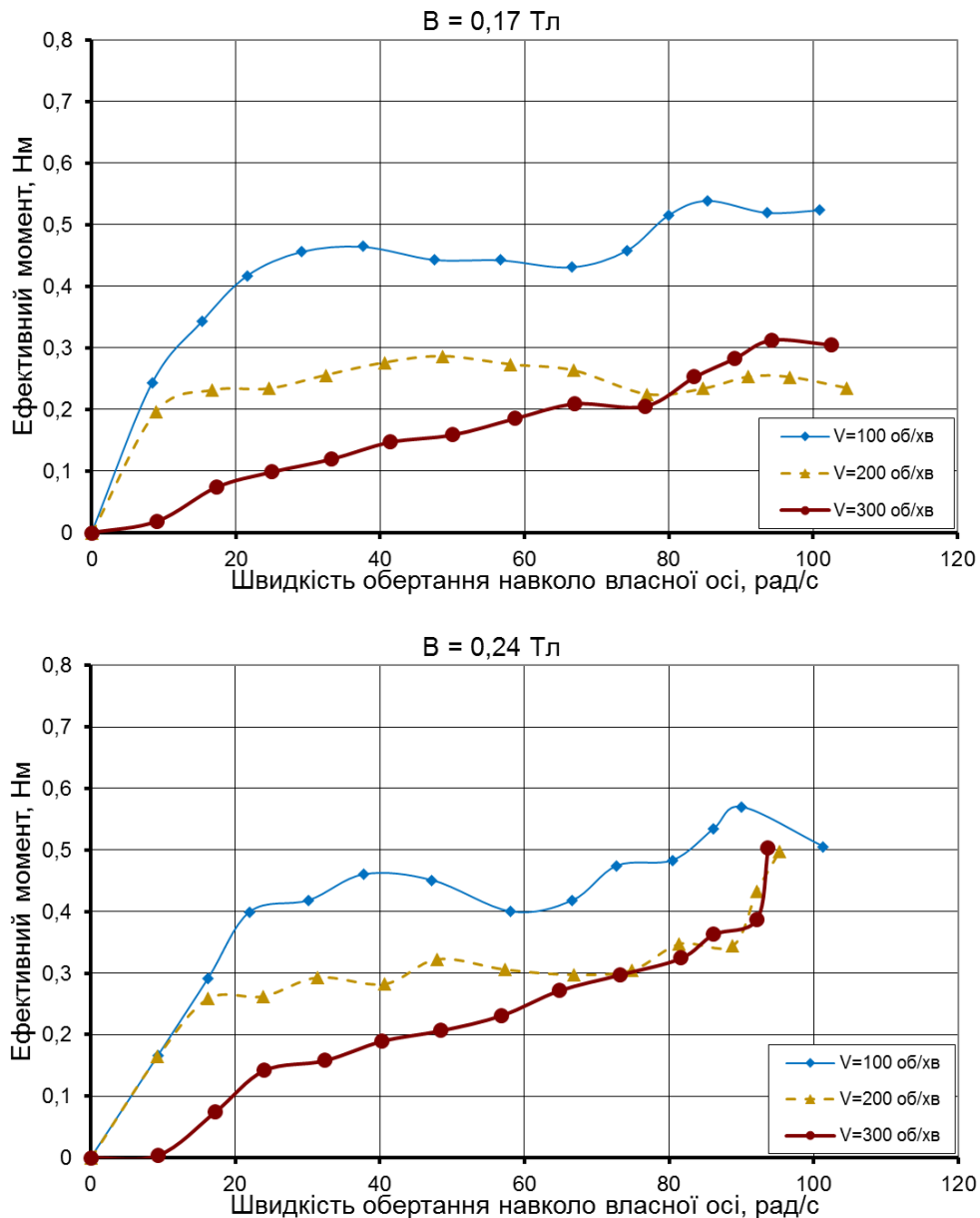
Рисунок 3.13 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву титану ВТ-8 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл (а) та 0,24 Тл (б), порошком Полімам-М (400/315)

Аномальні зростання і спадання моменту на при обробленні з магнітною індукцією 0,24 Тл зумовлені зміною характеру взаємодії (зміною складових сил оброблення та зміною характеру оброблення) при зміні швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни. При обробленні з магнітною індукцією 0,24 Тл оптимальне значення ефективного моменту в діапазоні швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни 150 – 250 об/хв та швидкості навколо своєї осі 70 – 100 рад/с.

3.1.8 Визначення ефективного моменту при обробленні бронзи БраЖ оскольчастим порошком Полімам-Т

На рис. 3.14 зображені результати досліджень при обробленні парамагнітної бронзи БраЖ оскольчастим магнітно-абразивним порошком Полімам-Т з зернистістю 400/315 мкм. Дослідження проводились при магнітній індукції 0,17 Тл та 0,24 Тл, швидкості обертання зразку навколо осі кільцевої ванни становили 100 об/хв, 200 об/хв, 300 об/хв.

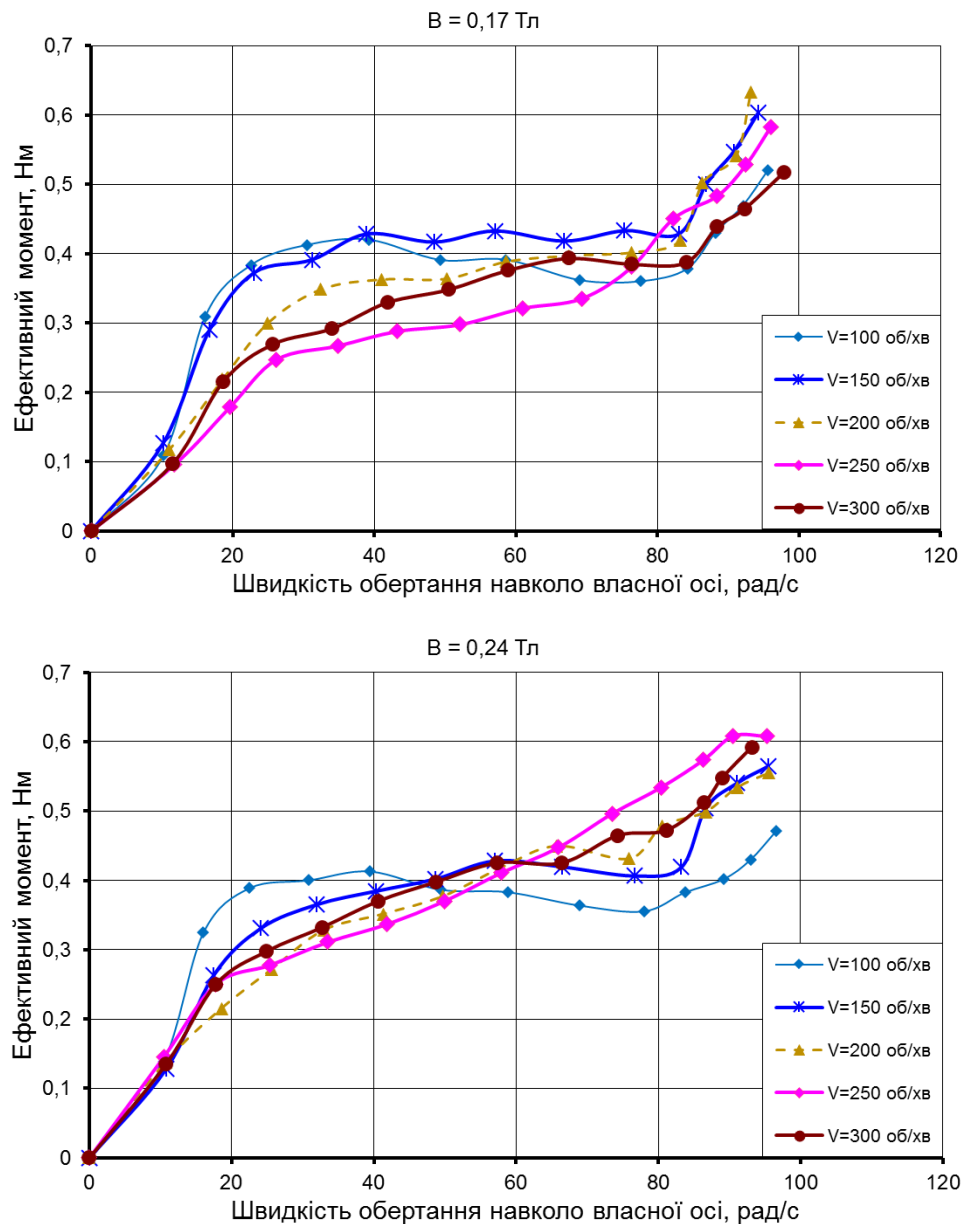
На графіках показано, що збільшення швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни спричиняє до зменшення значень ефективного моменту. Що може пояснюватись падінням тангенціальної складової сил різання. При швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни 100 об/хв, зміна магнітної індукції має несуттєвий вплив на зміну ефективного моменту. Що викликано зменшенням ролі магнітної індукції на оброблення в умовах великих робочих зазорів.



Рисунку 3.14 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні бронзи БраЖ в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл та 0,24 Тл, порошком Полімам-Т (400/315)

Ці залежності можна умовно поділити на 3 зони. Різке зростання моменту (зона 1) присутнє при швидкості обертання деталі навколо власної осі менше 15 – 20 рад/с. Для зони 2 (20 – 90 рад/с) характерне поступове зростання ефективного моменту. Показано що для швидкостей обертання навколо осі кільцевої ванни 200 та 300 об/хв збільшення величини магнітної

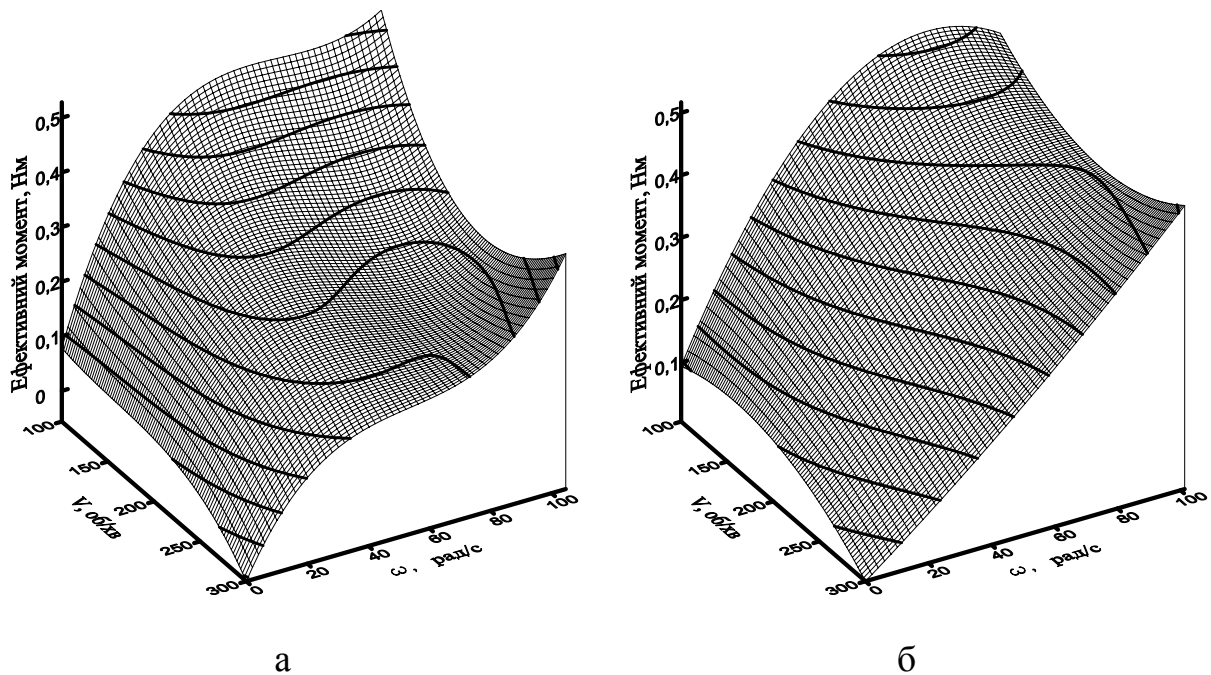
індукції приводить до аномальних зростань моменту на швидкості обертання навколо власної осі 90 рад/с. В цьому випадку підвищення магнітної індукції та швидкості обертання навколо власної осі сприяє зміні орієнтації зерен відносно поверхні зі зміною їх кутів різання. Це явище може впливати на характер різання, а саме перехід від різання та скобління матеріалу деталі до згладжування.



Рисунку 3.15 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні бронзи БраЖ в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл та 0,24 Тл, порошком Полімам-Т (200/100)

На рис. 3.15 показані залежність зміни величини ефективного моменту від швидкостей обертання навколо власної осі та осі кільцевої ванни, при обробленні бронзи БраЖ порошком Полімам-Т 200/100 мкм. Показано, що зміна магнітної індукції не спричиняє суттєвої зміни ефективного моменту. При всіх значеннях магнітної індукції спостерігається мінімальний вплив швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни. Для більш детального огляду було проведено дослідження зі швидкостями обертання навколо осі кільцевої ванни 150 та 250 об/хв. При таких значеннях швидкостей спостерігається аналогічне явище. Це пояснюється зміною характеру силової взаємодії при обробленні дрібнозернистим МАП. Збільшення швидкості обертання зразку навколо своєї осі веде за собою збільшення величини ефективного моменту. При швидкостях більше 80 рад/с (зона 3) присутнє аномальне зростання моменту через зміну положень зерен МАП відносно оброблюваної поверхні що призводить до зміни кутів різання зерен. Зміна кутів різання може спричинити зміну характеру оброблення з скобління матеріалу на згладжування.

На поверхневих графіках при обробленні порошком з більшою фракцією (Полімам-Т 400/315 мкм) (рис. 3.16) показано, що максимальні значення ефективного моменту спостерігаються при високих швидкостях обертання зразку навколо власної осі та низьких швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни. Це пояснюється переходом силової взаємодії від нормальної складової до тангенціальної.



Рисунку 3.16 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву бронзи БраЖ в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл (а) та 0,24 Тл (б), порошком Полімам-Т (400/315)

При обробленні порошком зернистістю 200/100 мкм (рис. 3.17) спостерігається малий вплив зміни швидкості обертання навколо кільцевої осі ванни на величину ефективного моменту. Це явище не залежить від зміни магнітної індукції, тому, слід вважати, що при обробленні дрібнозернистим порошком зміна швидкості руху деталі в робочій зоні не впливає на зміну моменту. Вплив на величину ефективного моменту має зміна швидкості обертання зразку навколо своєї осі, чим більша ця швидкість тим більший ефективний момент. Для значень магнітної індукції 0,17 та 0,24 Тл, оптимальні значення ефективного моменту в діапазоні швидкостей обертання навколо осі кільцевої ванни 100 – 150 об/хв та навколо своєї осі 30 – 80 рад/с.

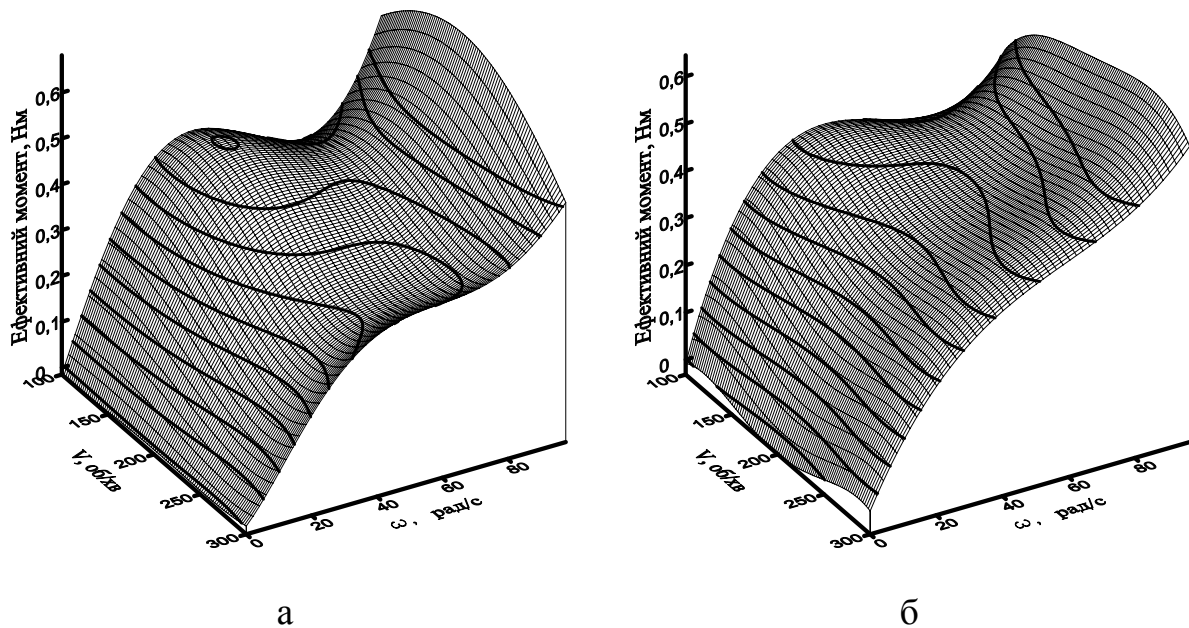


Рисунок 3.17 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву бронзи БраЖ в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл (а) та 0,24 Тл (б), порошком Полімам-Т (200/100)

3.1.9 Визначення ефективного моменту при обробленні бронзи БраЖ округлим порошком Полімам-М

Результати досліджень при обробленні бронзи БраЖ порошком округлим порошком Полімам-М з зернистістю 400/315 мкм наведені на рис. 3.18 Дослідження проводились при магнітній індукції 0,17 та 0,24 Тл, для кожного значення індукції змінювалось значення швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни 100 об/хв, 200 об/хв, 250 об/хв, 300 об/хв.

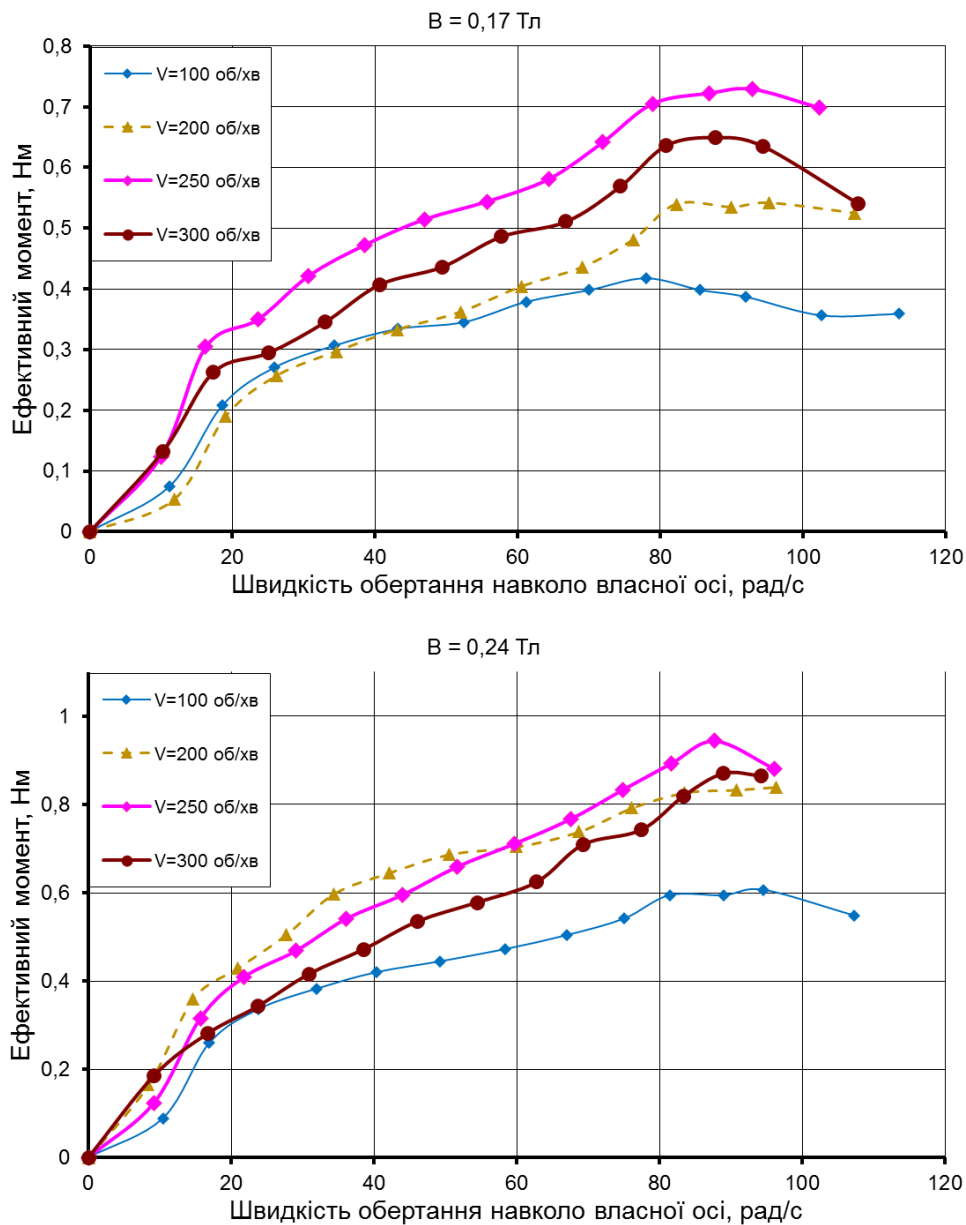


Рисунок 3.18 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні бронзи БраЖ в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл та 0,24 Тл, порошком Полімам-М (400/315)

Показано, що зростання швидкостей обертання деталі навколо осі кільцевої ванни та власної осі призводить до збільшення величини ефективного моменту. Це пояснюється збільшенням тангенціальної складової сил взаємодії, особливо це характерно для округлого порошку. Збільшення магнітної індукції призводить до збільшення величини ефективного моменту,

оскільки висока магнітна індукція утворює жорсткий МАІ, в якому ускладнені процеси перемішування, самозагострення порошку та розриву його макроформувань оброблюваною деталлю. Залежність можна умовно поділити на 3 зони. Для зони 1 (швидкість обертання зразку навколо власної осі менше 15 рад/с), характерне різке зростання ефективного моменту. У зоні 2 (15 – 90 рад/с) присутнє стабільне зростання моменту. Це явище пояснюється зміною силової взаємодії при обробленні, а саме зростанням тангенціальної складової сили різання що безпосередньо впливає на момент на двигуні мінішпинделя і аналогічне зміні механізму різання, який описано для MAO інших парамагнітних матеріалів. У зоні 3 (більше 90 рад/с) відбувається падіння ефективного моменту. На рис. 3.19 показано, що при обробленні бронзи БраЖ магнітно-абразивним порошком Поліам-М (400/315 мкм) найбільший ефективний момент досягається при високих значеннях обертання зразку навколо осі кільцевої ванни та високих швидкостях обертання навколо своєї осі (до 90 рад/с).

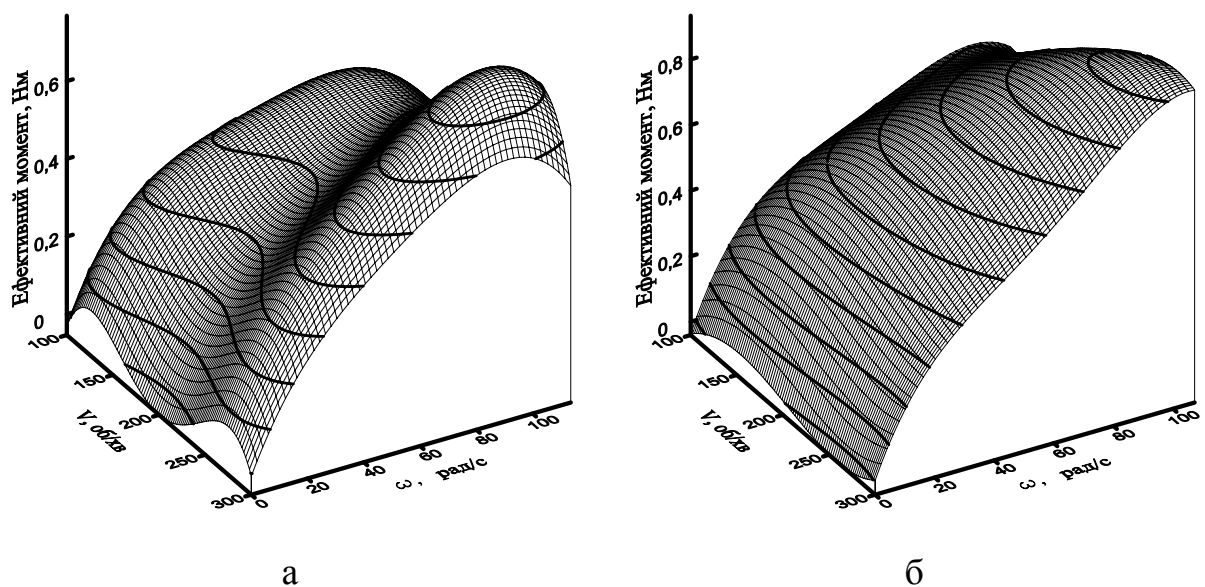


Рисунок 3.19 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сплаву бронзи БраЖ в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл (а) та 0,24 Тл (б), порошком Поліам-М (400/315)

Збільшення магнітної індукції призводить до збільшення ефективного моменту.

3.1.10 Ефективний момент при обробленні сталі 40X13 оскольчастим порошком Полімам-Т

Результати дослідження при використанні зразку зі сталі та порошку з фракцією 400/315 мкм показані на рис. 3.20.

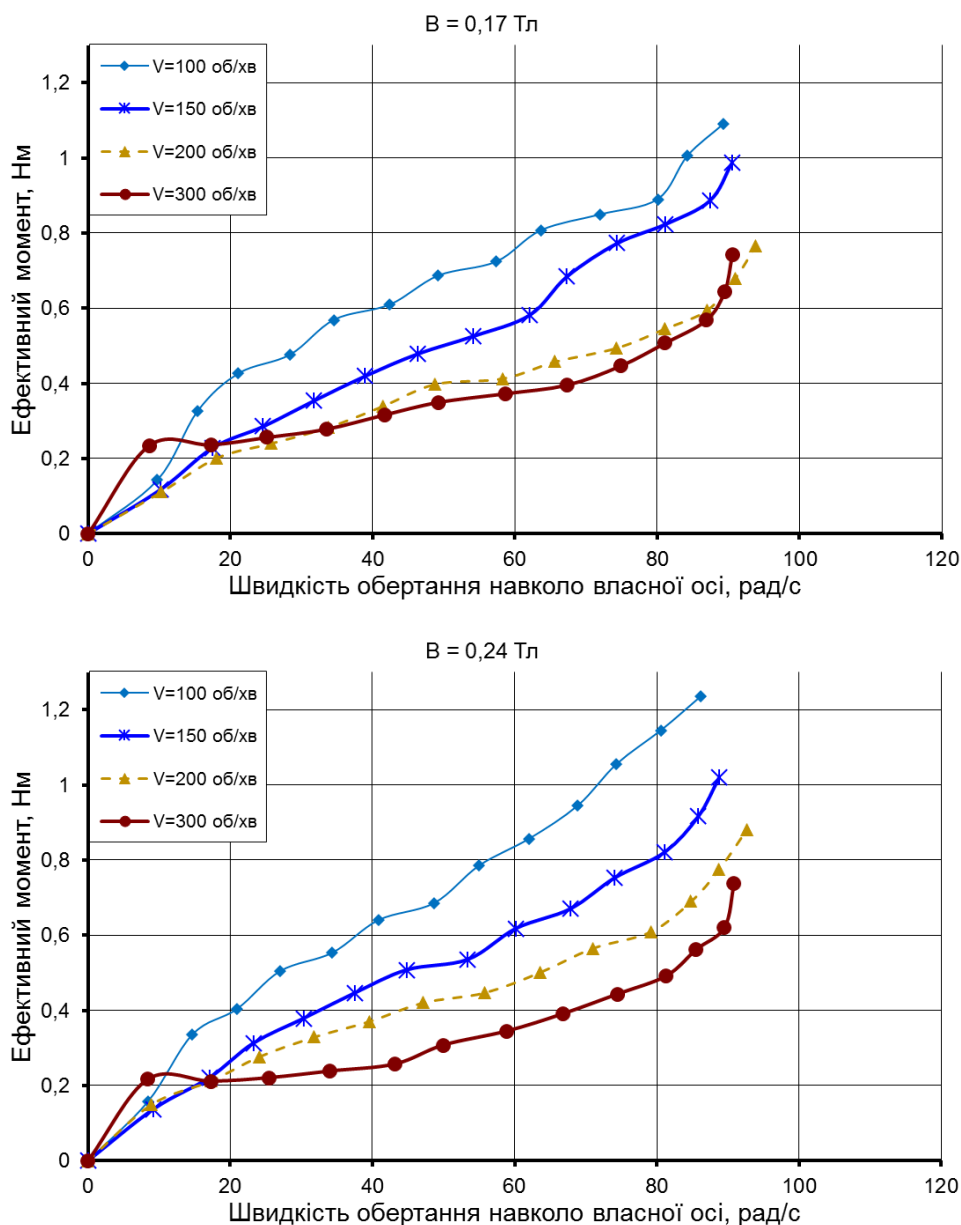


Рисунок 3.20 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сталі 40X13 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл та 0,24 Тл, порошком Полімам-Т (400/315)

Дослідження проводилось при магнітній індукції 0,17 Тл та 0,24 Тл зі швидкостями обертання навколо осі кільцевої ванни 100 об/хв, 150 об/хв, 200 об/хв, 300 об/хв.

Показано, що при обробленні феромагнітної сталі присутнє несуттєве збільшення ефективного моменту при збільшенні магнітної індукції. Це збільшення пояснюється збільшенням жорсткості МАІ, але особливості оброблення при великих магнітних зазорах вплив магнітної індукції на силову взаємодію менший. Тому, при такому магнітному зазорі силова взаємодія найбільше залежить від динамічних чинників. Збільшення швидкості переміщення у робочому зазорі призводить до зменшення ефективного моменту. Це викликано зміною складових сил взаємодії, при високих швидкостях руху зразку в магнітному зазорі сили нормального тиску МАІ на поверхню деталі переважають сили тертя між порошком і зразком. Ефективний момент залежить від сил тертя. Залежності практично лінійні крім залежності при швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни 300 об/хв на якій достатньо виражені аномальні зростання моменту при швидкості обертання зразку навколо власної осі до 10 рад/с та більше 90 рад/с. Тому доцільно умовно поділити залежність на 2 зони – менше 90 рад/с та більше 90 рад/с, у зоні 1 зростання відбувається поступово, у зоні 2 – різко. Це явище викликано поворотом зерен МАІ та зміною їх кутів різання що різко змінює характер різання зі скобління на згладжування.

При обробленні сталі порошком Полімам-Т з зернистістю 200/100 мкм (рис. 3.21) наявне спадання ефективного моменту зі зростанням швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни. Це можна пояснити переходом сил взаємодії з сил тиску МАІ на деталь до сил тертя між поверхнею деталі та МАІ. Зміна магнітної індукції має несуттєвий вплив на зміну ефективного моменту. Що викликано малою дією магнітної індукції в робочих зонах з великим магнітним зазором.

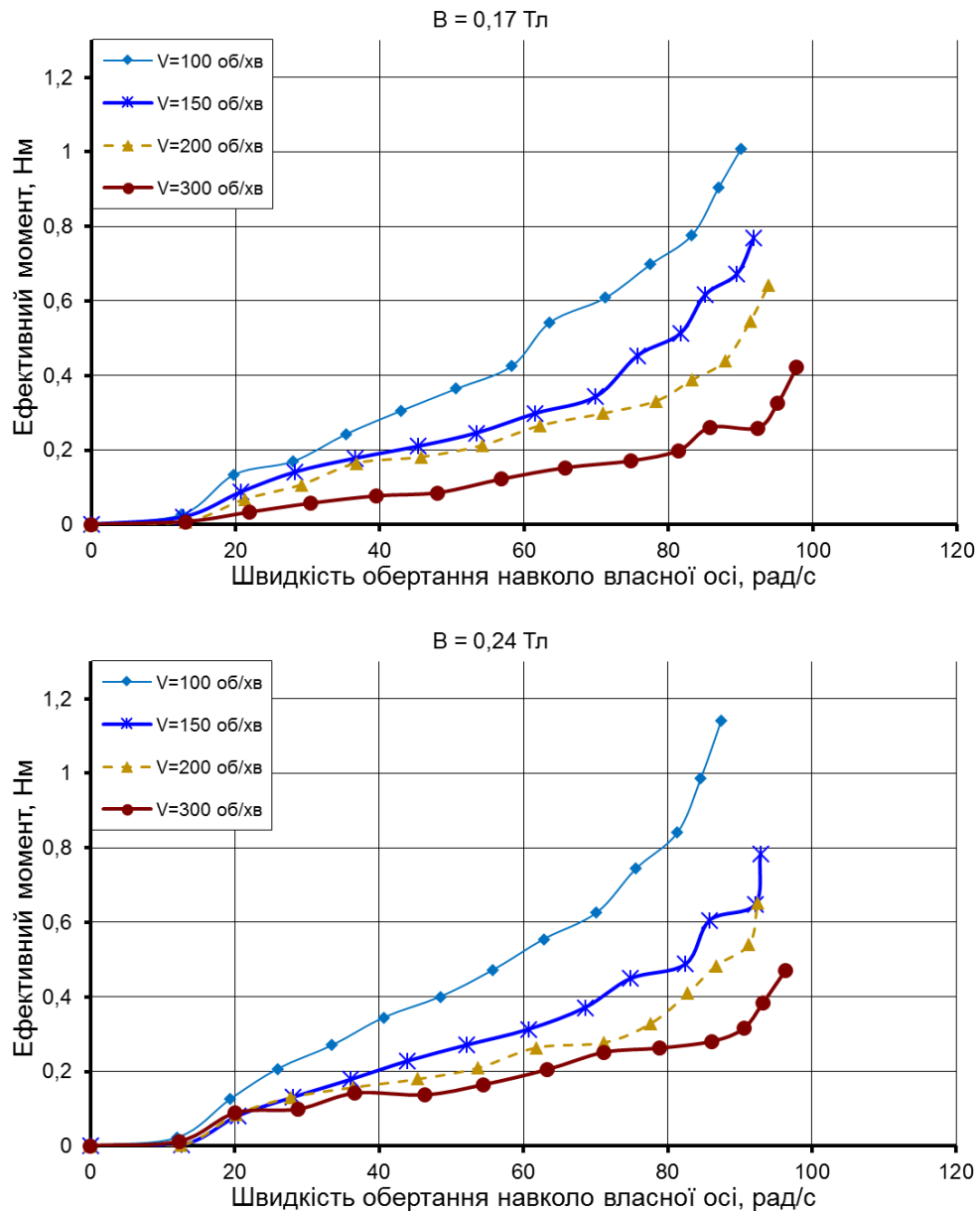


Рисунок 3.21 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сталі 40X13 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл та 0,24 Тл, порошком Полімам-Т (200/100)

При всіх значеннях магнітної індукції та швидкостей переміщення в кільцевій ванні, спостерігається лінійне зростання ефективного моменту при зростанні швидкості обертання навколо власної осі в діапазоні 0–90 рад/с. При швидкості більше 90 рад/с починається різке зростання ефективного моменту.

В результаті аналізу отриманих поверхонь (рис. 3.22 та рис. 3.23), показано, що при різних значеннях магнітної індукції, ефективний момент у рівній мірі залежить від зміни швидкості переміщення у робочому зазорі та швидкості обертання навколо власної осі. Встановлено, що максимальні значення ефективного моменту виникають при високих швидкостях обертання навколо власної осі та низьких швидкостях обертання навколо осі кільцевої ванни.

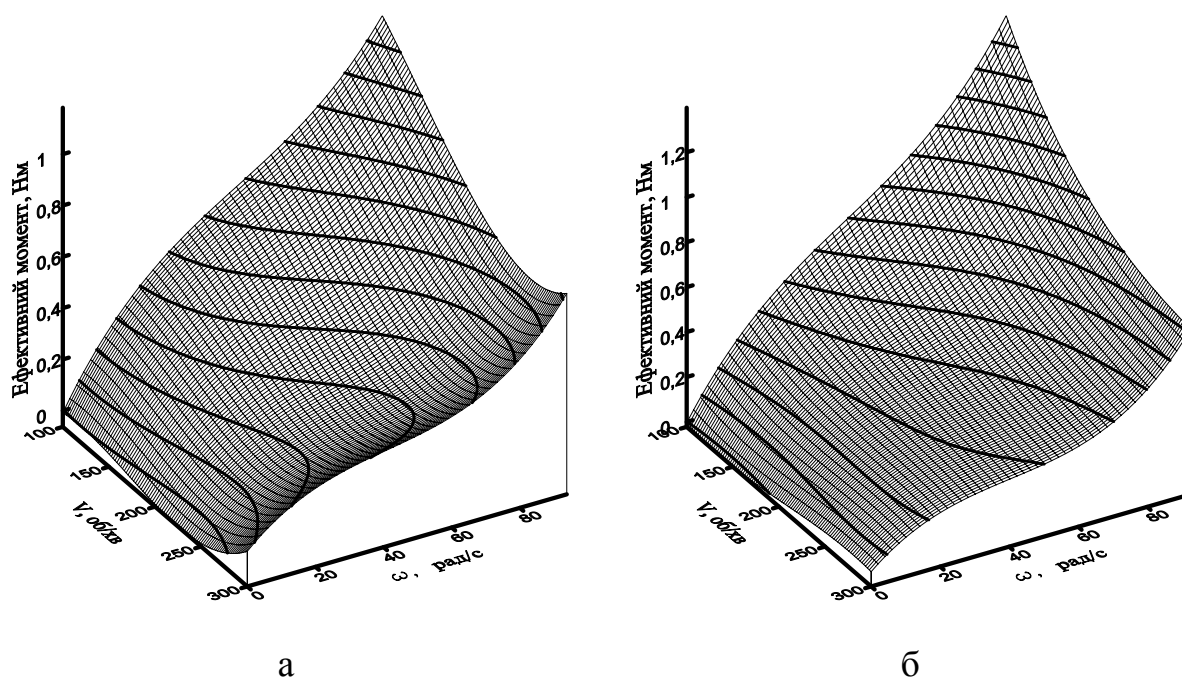


Рисунок 3.22 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сталі 40Х13 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл (а) та 0,24 Тл (б), порошком Полімам-Т (400/315)

При обробленні порошком зернистістю 200/100 мкм (рис. 3.23), спостерігаються аномальні зростання ефективного моменту при зміні швидкості обертання зразку навколо осі кільцевої ванни. Це пов'язано з переорієнтацією зерен, зміною їх кутів різання та, як наслідок, зміною характеру оброблення. Оптимальні значення ефективного моменту досягаються при збільшенні частоти обертання деталі навколо своєї осі, при

збільшенні магнітної індукції, та при зменшенні швидкості руху в робочій зоні.

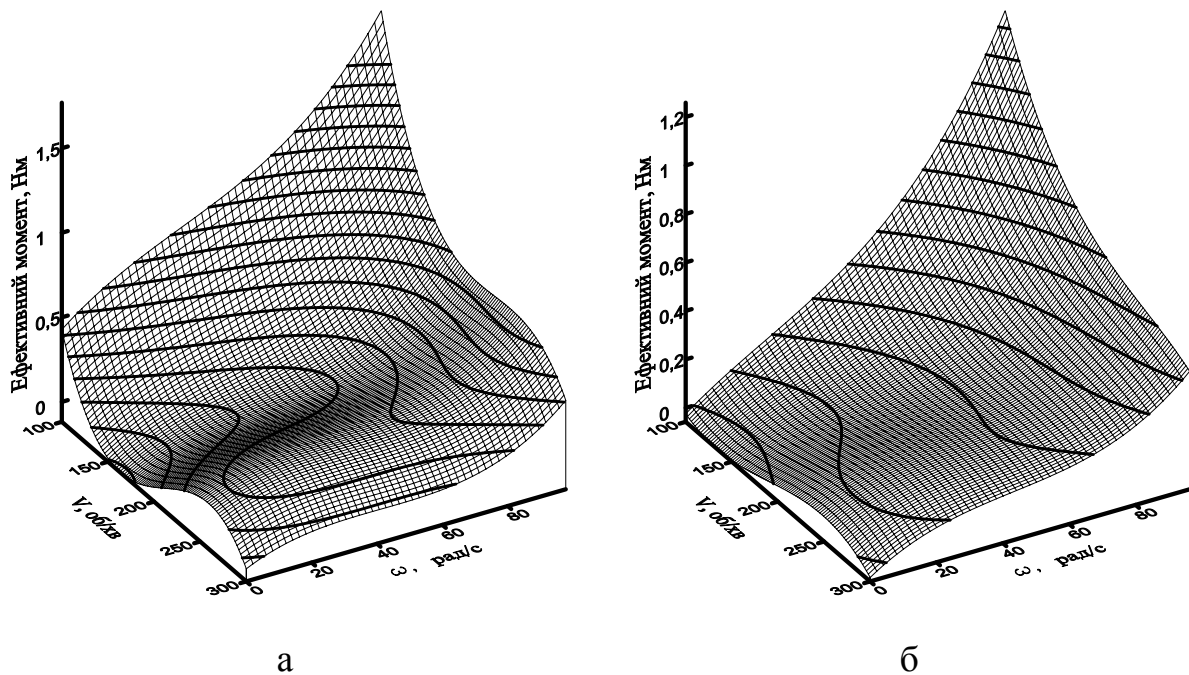


Рисунок 3.23 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сталі 40X13 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл (а) та 0,24 Тл (б), порошком Полімам-Т (200/100)

3.1.11 Визначення ефективного моменту при обробленні сталі 40X13 округлим порошком Полімам-М

Результати дослідження при обробленні зразку зі сталі 40X13 округлим магнітно-абразивним порошком Полімам-М з фракцією 400/315 мкм на рис. 3.24. При кожному значенні магнітної індукції 0,17 та 0,24 Тл змінювались швидкості обертання навколо власної осі 100 об/хв, 150 об/хв, 200 об/хв, та 300 об/хв.

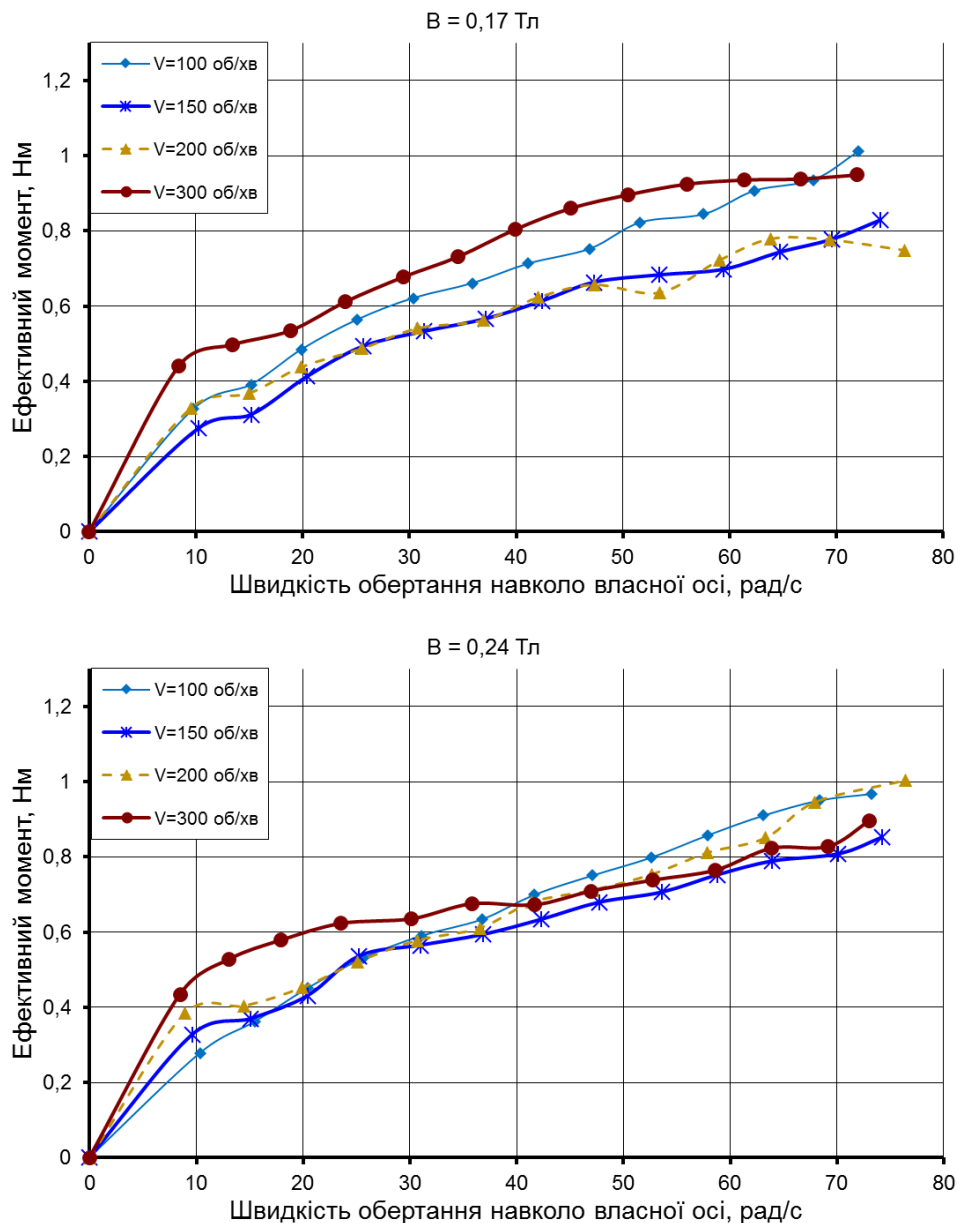


Рисунок 3.24 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сталі 40X13 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл та 0,24 Тл, порошком Полімам-М (400/315)

Показано, що при збільшенні швидкості обертання деталі навколо своєї осі відбувається підвищення ефективного моменту. Це пояснюється збільшенням тангенціальної складової сил взаємодії, що безпосередньо впливає на крутний момент двигуна мінішпинделя. Умовно залежність можна поділити на 2 зони: в зоні 1 (швидкість обертання зразку навколо своєї осі

менше 10 рад/с) відбувається різке зростання ефективного моменту, для зони 2 (швидкість більше 10 рад/с) характерне стабільне і поступове зростання моменту. Це зумовлено зміною характеру оброблення і складових сил взаємодії. Зміна швидкості обертання зразку навколо осі кільцевої ванни не впливає на зміну ефективного моменту. Це пояснюється тим, що при обробленні округлим порошком існує великий вплив сил тертя, що зумовлені формою порошка та його здатністю утворюватися в конгломерації з 5-6 зерен що збільшують площі дотику порошку з поверхнею деталі [15]. Зміна магнітної індукції не має суттєвого впливу на величину ефективного моменту. На рис. 3.25 показано що найбільший вплив на ефективний момент має зміна швидкості обертання зразку навколо своєї осі.

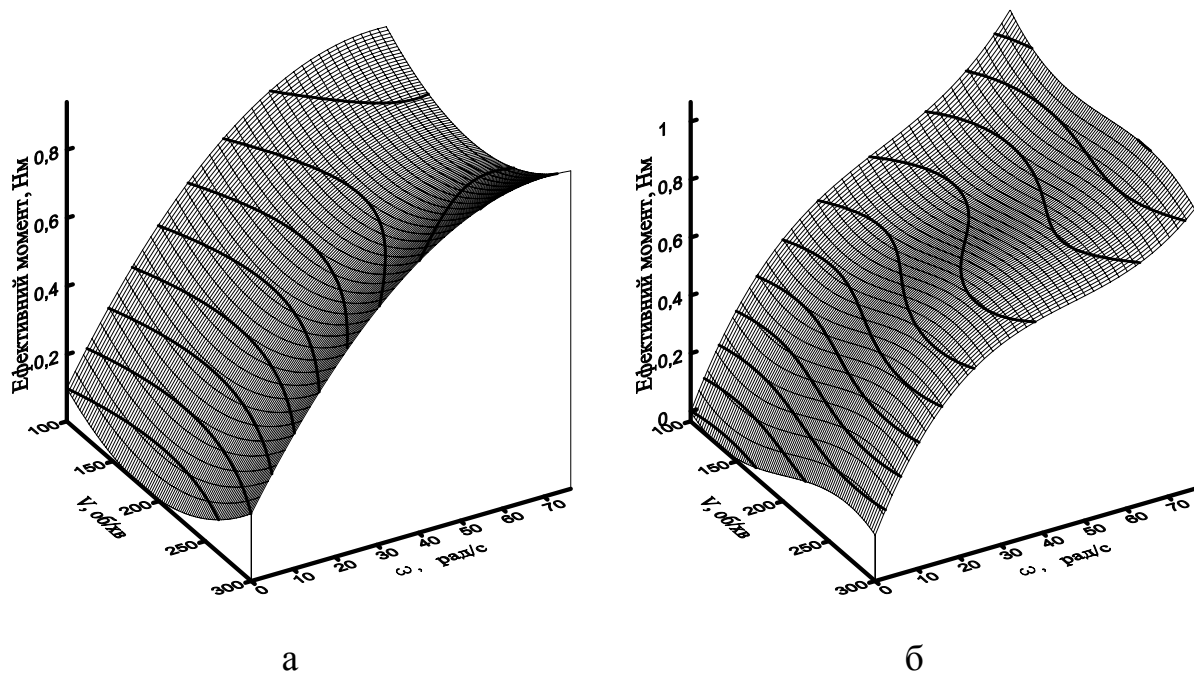


Рисунок 3.25 – Зміна величини ефективного моменту при обробленні сталі 40Х13 в залежності від швидкості обертання зразків навколо власної осі і осі кільцевої ванни при магнітній індукції в робочих зазорах 0,17 Тл (а) та 0,24 Тл (б), порошком Полімам-М (400/315)

Збільшення магнітної індукції має несуттєвий вплив на вплив ефективного моменту. При магнітній індукції 0,17 Тл присутні коливання ефективного моменту при зміні швидкості обертання зразку навколо своєї осі,

натомість при значенні індукції в 0,24 Тл – зміна швидкості руху зразку в робочій зоні не створює значних коливань. При обробленні з сталі 40Х13 оптимальні технологічні режими становлять: магнітна індукція 0,24 Тл та швидкість обертання деталі навколо своєї осі в діапазоні 60 – 80 рад/с.

3.2 Порівняння результатів вимірювання при обробленні феро- та парамагнітних матеріалів.

3.2.1 МАІ сформовано з магнітно-абразивного порошку Полімам-Т

Оброблення феромагнітного і парамагнітних матеріалів при однакових технологічних умовах має різний характер. Наприклад, для всіх немагнітних матеріалів, значень індукції, швидкостей оброблення, розміру зерен порошку – характерним є розподіл залежності ефективного моменту на 3 частини: початкову, сталу зону та зону швидкого зростання. На початковій зоні, при значеннях швидкості обертання зразку не більше 20 рад/с, відбувається різке зростання ефективного моменту. Це спричинено зміною характеру взаємодії МАІ з поверхнею деталі, а саме переходу від нормального тиску на деталь до тангенціальної сили тертя. На наступній зоні відбувається стабільне підвищення моменту без суттєвих стрибків, яке можливо описати за допомогою лінійної функції. На третій стадії (швидкість обертання навколо своєї осі більше 80 рад/с) відбувається різке зростання значень ефективного моменту. Це можна пояснити переважанням тангенціальних сил над нормальними силами взаємодії між порошком і деталлю, що в деякій мірі аналогічно до першій стадії. А також це пояснюється поворотами окремих зерен МАІ. Натомість при обробленні феромагнітного матеріалу не спостерігається явного розподілу залежності на 3 зони. Ефективний момент стабільно зростає зі зростанням швидкості обертання зразку навколо своєї осі, при швидкості 80 – 90 рад/с спостерігається різке зростання моменту, так само як і при обробленні інших парамагнітних матеріалів. Це зумовлено магнітними властивостями матеріалу, дією пондеромоторних сил, які вірогідно призводять до локального збільшення/зменшення магнітного поля в

безпосередній близькості до оброблюваної поверхні і нівелюють активне повертання частинок МАІ.

Оброблення дрібнозернистим МАП парамагнітних матеріалів створює умови, при яких зміна швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни не викликає суттєвої зміни ефективного моменту. Для феромагнітної сталі при тих самих технологічних умовах, такого явища не спостерігається.

Величина ефективного моменту при обробленні сталі більша в 1,5 – 2 рази у порівнянні з парамагнітними титаном, алюмінієм та бронзою.

При обробленні парамагнітних матеріалів існують відмінності в характері взаємодії деталі з магнітно-абразивним інструментом викликані, насамперед, триботехнічними властивостями оброблюваних матеріалів.

При обробленні зразків з сплаву алюмінію Д-16, бронзи БраЖ та титанового сплаву ВТ-8 порошком Полімам-Т з зернистістю 400/315 мкм спостерігаються схожі залежності ефективного моменту від зміни швидкостей обертання навколо своєї осі та навколо осі кільцевої ванни. При обробленні зразків з бронзи та титану збільшення магнітної індукції не має суттєвого впливу на величину ефективного моменту, що зумовлено малим впливом магнітної індукції на оброблення в умовах великих робочих зазорів. Натомість при обробленні алюмінію збільшення магнітної індукції приводить до незначного збільшення ефективного моменту. Оброблення цих зразків порошком Полімам-Т з зернистістю 200/100 мкм характеризується зменшенням впливу на ефективний момент шляхом зміни швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни. Таке явище виникає за рахунок більшої щільності порошку в робочій зоні, що веде за собою рівномірну взаємодію МАП з поверхнею деталі при зміні швидкості руху в робочій зоні.

3.2.2 МАІ сформовано з магнітно-абразивного порошку Полімам-М

При обробленні парамагнітних матеріалів округлим порошком Полімам-М спостерігаються залежності ефективного моменту відмінні від

оброблення оскольчастим порошком. Збільшення швидкостей обертання в кільцевій ванні спричиняє збільшення величини ефективного моменту. Таке явище, вірогідно, зумовлене особливостями утворення квазістабільного МАІ з такого порошку. Відомо, що зерна округлого порошку при обробленні групуються в конгломерації з 5-6 зерен [15], такі утворення збільшують поверхню дотику між МАІ та поверхнею деталі, що зумовлює збільшення сил тертя при збільшеннях будь-яких швидкостей різання (головного руху та подачі). До того ж, для руйнування та зміни цих конгломерацій необхідно затратити більше енергії. Ще однією особливістю округлого порошку є характер оброблення, а саме, переважання вигладжування над скоблінням, що зумовлено практичною відсутністю гострих різальних кромek на поверхні зерен [1, 16].

Залежності при обробленні досліджуваних парамагнітних зразків (крім титанового) умовно поділяються на 3 зони. 1 зона (швидкість обертання 0 – 15 рад/с) супроводжується різким зростанням ефективного моменту, 2 зона (15 – 90 рад/с) – поступове і стабільне зростання моменту, 3 зона (більше 90 рад/с) – різке спадання моменту. Таку залежність можна пояснити зміною складових сил взаємодії між зразком та магнітно-абразивним порошком, псевдорозрідженням МАІ, руйнуванням квазістабільних утворень в комплексі з пондеромоторними силами, а також зміною сил адгезійної взаємодії. У випадку з обробленням зразків зі сплаву титану ВТ-8 та сталі 40Х13 яскраво вираженої зони 3 не спостерігається, різкі коливання властиві цій зоні, можуть спостерігатися на швидкостях більших ніж у цьому дослідженні. Тому для визначення цього явища необхідно проводити подальші дослід.

Оброблення округлим порошком Полімам-М парамагнітних матеріалів супроводжується більшими значеннями ефективного моменту (до 2 разів) ніж при обробленні оскольчастим порошком Полімам-Т. Це пояснюється збільшеними силами тертя через більшу зону контакту між зернами порошку та поверхнею деталі, роботою складніших квазістабільних утворень МАІ. При

оброблені сталі не спостерігається значних змін при використанні порошків різних марок. Оброблення парамагнітних та феромагнітних матеріалів порошком Полімам-М не має великих відмінностей в величині ефективного моменту.

3.2.3 Оброблення парамагнітних матеріалів

Оскільки ефективний момент практично визначається силами тертя між поверхнею зразку та магнітно-абразивним порошком, то різниця між значеннями ефективного моменту при обробленні різних парамагнітних матеріалів повинна визначатися триботехнічними характеристиками цих матеріалів. Для наглядного показу відмінностей залежностей ефективних моментів між матеріалами, було апроксимовано лінійну функцію від графіків на відрізку 20 – 80 рад/с (рис. 3.26). Вказані функції вигляду $y = a \cdot \omega + b$, де b – характеризує безпосередній вплив сил тертя при нульовій швидкості обертання зразків навколо власної осі, a – коефіцієнт, який характеризує зміну сил тертя при різних значеннях ω – частоти обертання зразків навколо власної осі.

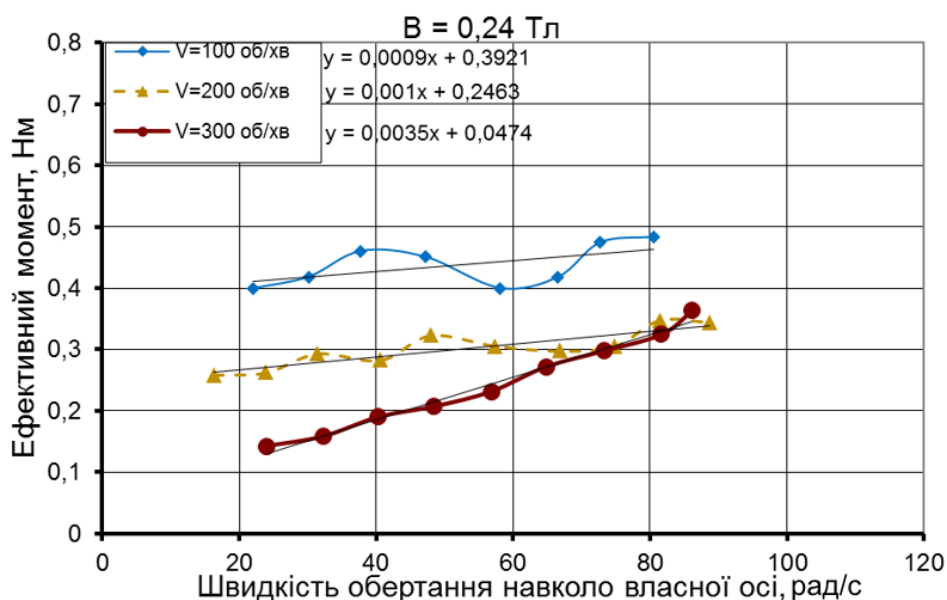


Рисунок 3.26 – Лінійні залежності ефективного моменту на відрізку 20 – 80 рад/с при обробленні бронзи БраЖ магнітно абразивним порошком Полімам-Т (400/315 мкм) з магнітною індукцією 0,24 Тл

Значення коефіцієнтів a та b при обробленні парамагнітних матеріалів порошком Полімам-Т з фракцією 400/315 мкм наведені в табл. 3.1, порошком Полімам-Т з фракцією 200/100 мкм – в табл. 3.2.

Таблиця 3.1. – Коефіцієнти лінійних рівнянь при обробленні порошком Полімам-Т з фракцією 400/315 мкм

Матеріал зразку	Швидкість навколо осі кільцевої ванни, об/хв	0,17 Тл		0,24 Тл	
		a	b	a	b
Алюміній	100	-0,00005	0,42935	-0,0002	0,579
	200	0,0016	0,2808	0,0017	0,3088
	300	0,0036	0,0316	0,0039	0,1385
Бронза	100	0,0013	0,394	0,0009	0,3921
	200	-0,0001	0,258	0,001	0,2463
	300	0,003	0,0109	0,0035	0,0474
Титан	100	0,0474	0,3125	0,0007	0,3326
	200	0,0005	0,1576	0,0018	0,1261
	300	0,0021	0,0028	0,0033	0,0507

Показано, що при обробленні зразків порошком Полімам-Т 400/315 мкм, при всіх значеннях магнітної індукції та для всіх матеріалів, коефіцієнт b знижується при зростанні швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни. Це пов'язано з зниженням тангенціальної складової сили взаємодії (безпосередня сила тертя) зі зростанням швидкості руху в робочій зоні. Збільшення коефіцієнту a , що відповідає за зміну тертя при різних значеннях частоти обертання навколо власної осі зразка, показує, що зі збільшенням швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни збільшується вплив обертання зразку навколо своєї осі. Це може пояснюватися тим що при збільшенні швидкості руху зразку в робочій зоні на тангенціальну складову починає більше впливати саме рух зразку навколо власної осі. Зміна магнітної індукції, практично не впливає на сили тертя в цьому випадку. Серед

матеріалів найбільші значення коефіцієнтів a та b спостерігаються при обробленні сплаву алюмінію Д-16 а найменші – при обробленні титанового сплаву ВТ-8. Таке явище можна пояснити більшими коефіцієнтами тертя при обробленні між сплавом алюмінію та порошком Полімам-М [15] та можливими шаржуванням окремих складових порошку і активізацію адгезійних процесів в парі оброблюваний матеріал - матеріал магнітно-абразивного порошку.

Таблиця 3.2. – Значення коефіцієнтів лінійних рівнянь при обробленні порошком Полімам-Т з фракцією 200/100 мкм

Матеріал зразку	Швидкість навколо осі кільцевої ванни, об/хв	0,17 Тл		0,24 Тл	
		a	b	a	b
Алюміній	100	0,0016	0,2629	0,0008	0,2996
	150	0,0022	0,219	0,0026	0,1692
	200	0,0025	0,1592	0,0028	0,182
	250	0,0028	0,0764	0,0028	0,1284
	300	0,0021	0,0643	0,0022	0,2226
Бронза	100	-0,0006	0,4221	-0,0008	0,424
	150	0,0008	0,3733	0,0019	0,2848
	200	0,0017	0,2796	0,0038	0,1773
	250	0,0024	0,1813	0,0048	0,1453
	300	0,0026	0,2028	0,0038	0,1994
Титан	100	-0,0009	0,2287	-0,0006	0,2984
	150	-0,0006	0,3068	0,0011	0,1818
	200	0,0009	0,2098	0,0012	0,1522
	250	0,0011	0,2098	0,0021	0,1849
	300	0,0018	0,154	0,0023	0,1347

При обробленні цих самих зразків порошком Полімам-Т з зернистістю 200/100 мкм при тих самих значеннях магнітної індукції, показано що зміна магнітної індукції не приводить до змін сил тертя. Зростання швидкості обертання зразків навколо осі кільцевої ванни призводить до зростання коефіцієнту a , що вказує на збільшення впливу швидкостей обертання зразку навколо своєї осі на значення коефіцієнтів тертя, а також і на значення ефективного моменту при обробленні. Зі зростанням швидкості обертання навколо своєї осі наявне зменшення коефіцієнту b . Аномальні коливання значень коефіцієнтів при зміні швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни можуть бути пов'язані з адгезійною взаємодією між поверхнею деталі та магнітно-абразивним порошком, що викликає непередбачувані відривання часточок від поверхні деталі. Для підтвердження цього, після оброблення зразки були очищені від поверхневого шару дрібнозернистим наждачним папером. На рис.3.27 показано, що після оброблення зразки були покриті темним поверхневим шаром, який досить легко видаляється шляхом додаткового шліфування.

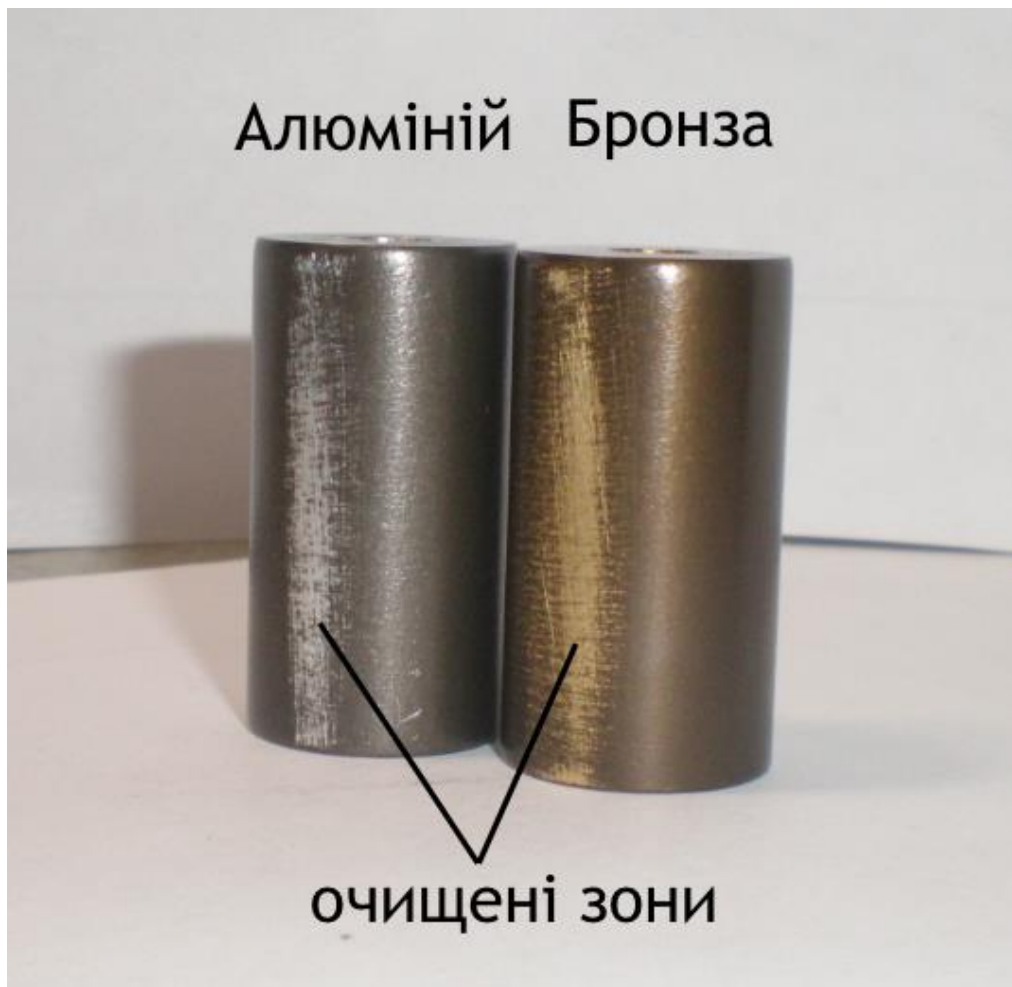


Рисунок 3.27 – Поверхневий шар зразків після оброблення

Найбільше значення коефіцієнтів спостерігається при обробленні сплаву алюмінію, найменше – при обробленні сплаву титану. Таке явище характерне для тертя між зразками та порошком Полімам-Т [15]. В табл. 3.3 наведені коефіцієнти при обробленні магнітно-абразивним порошком Полімам-М

При обробленні порошком Полімам-М з зернистістю 400/315 мкм спостерігається зменшення значення коефіцієнту b при збільшенні швидкості обертання зразку навколо осі кільцевої ванни. Це викликано спаданням тангенціальної складової сил різання. Збільшення швидкості руху зразку в робочій зоні, призводить до збільшення ролі обертання зразку навколо своєї осі на тангенціальну складову сил різання. Різкі коливання значення коефіцієнту при зміні швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни

можуть бути зумовлені адгезійною взаємодією між деталлю та порошком з відривами часточок від поверхні деталі і локальною дією пондеромоторних сил, які в певній мірі залежать від електричних властивосте порошкового МАІ [15].

Таблиця 3.3. – Коефіцієнти лінійних рівнянь при обробленні порошком Полімам-М з фракцією 400/315 мкм

Матеріал зразку	Швидкість навколо осі кільцевої ванни, об/хв	0,17 Тл		0,24 Тл	
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Алюміній	100	0,0023	0,446	0,0036	0,4043
	200	0,0056	0,2567	0,0058	0,3762
	250	0,0051	0,2984	0,0062	0,3077
	300	0,0061	0,2733	0,009	0,3076
Бронза	100	0,0032	0,1791	0,0045	0,2185
	200	0,0049	0,1135	0,0063	0,3276
	250	0,006	0,2215	0,0083	0,221
	300	0,0056	0,1621	0,0077	0,1656
Титан	100	0,0006	0,4876	0,0022	0,4358
	150	0,0027	0,2978	0,0032	0,4269
	200	0,0034	0,3073	0,0052	0,4004
	250	0,0039	0,3383	0,0052	0,3156
	300	0,0056	0,2682	0,0069	0,301

Найбільші значення коефіцієнту *b* та ефективного моменту спостерігаються при обробленні сплаву титану. Згідно з досліджень [15], коефіцієнти тертя між порошком Полімам-М та титановим сплавом більші ніж між цим порошком та сплавом алюмінію.

Коефіцієнт *a* зростає з підвищенням швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни. Це пояснюється збільшенням впливу швидкості кругової подачі (обертання деталі навколо своєї осі) на ефективний момент. На різкі

коливання значень коефіцієнту можуть впливати адгезійна взаємодія, пондеромоторні сили, руйнування квазістабільних утворень МАІ. При обробленні округлим порошком спостерігається вплив збільшення магнітної індукції на підвищення коефіцієнту a . Зміна матеріалу несуттєво впливає на значення коефіцієнту (при значенні магнітної індукції 0,17 Тл), тому можливо зробити висновок що при таких умовах має місце зміна характеру взаємодії деталі з магнітно-абразивним порошком.

В таблицях показано, що параметр a , що характеризує безпосередній вплив сил тертя при зміні швидкості обертання зразків навколо своєї осі залежить від матеріалу деталі, швидкості обертання навколо кільцевої осі, марки порошку та його зернистості, величини магнітної індукції. Коефіцієнт зростає при зростанні швидкості обертання навколо осі ванни та при зростанні коефіцієнту тертя між матеріалом деталі і порошком. Це пояснюється збільшенням впливу обертання зразку навколо своєї осі на тангенціальні сили взаємодії та величину ефективного моменту при збільшенні швидкості руху зразку в робочій зоні.

Параметр b який характеризує безпосередній вплив сил тертя на оброблення при нульових швидкостях обертання навколо своєї осі залежить від матеріалу деталі, порошку та швидкості руху в робочому зазорі. При збільшенні швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни, коефіцієнт падає.

Різкі коливання величини коефіцієнтів можуть бути викликані сукупністю факторів, таких як пондеромоторні сили, адгезійна взаємодія між поверхнею деталі та МАП, руйнування квазістабільних утворень МАІ, повороту зерен порошку та його самозагострення з подальшою зміною різальних кутів.

Висновки

За результатами виконаних досліджень встановлено, що:

1. Показано, що при обробленні феромагнітної сталі оскольчастим порошком високі показники ефективного моменту (на рівні 1 – 1,2 Нм) спостерігаються при спаданні швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни від 100 до 150 об/хв та зростанні швидкості обертання навколо власної осі в діапазоні 60 – 80 рад/с. При обробленні округлим порошком – при зростанні обох факторів.

2. При обробленні парамагнітних матеріалів оскольчастим порошком високі показники ефективного моменту спостерігаються при спаданні швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни (на рівні від 100 до 150 об/хв) та зростанні швидкості обертання навколо власної осі (60 – 80 рад/с). При обробленні мілкозернистим або округлим порошком вплив швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни на величину ефективного моменту несуттєвий.

3. Залежності зміни величини ефективного моменту від швидкості обертання навколо власної осі можна умовно поділити на 3 зони з різною інтенсивністю зростання (спадання) ефективного моменту: 1 зона 0 – 20 рад/с – стрімке зростання моменту, 2 зона 20 – 80 рад/с – поступове зростання, 3 зона – більше 80 рад/с – стрімке зростання.

Показано, що залежності в зоні стабільного зростання (зона 2) можна апроксимувати лінійними функціями. Коефіцієнти цих функцій характеризують вплив сили тертя на оброблення з урахуванням обертання деталі навколо своєї осі .

4. Зміна магнітної індукції в умовах великих магнітних зазорів не спричиняє суттєвих змін ефективного моменту.

5. Оброблення округлим порошком супроводжуються більшими значеннями ефективного моменту на 150 – 200 % ніж оброблення оскольчастим, що пояснюється здатністю округлого порошку як до більшого ущільнення, так і більш високою здатністю його до намагнічування.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

4.1 Опис ідеї проекту

Сьогодні у машинобудуванні існує велика кількість деталей та виробів різноманітних форм і складності. В ході розвитку науки та техніки ця кількість постійно зростає, з кількістю зростають і складність та якісні вимоги до деталей. Для забезпечення таких параметрів виробу розробляються нові і вдосконалюються існуючі технології та процеси виготовлення. Одною з таких технологій є магнітно-абразивне оброблення (МАО). МАО дозволяє обробляти деталі з високою точністю, малим відхиленням від форми і шорсткістю $Ra\ 0,01 - 0,4\ \mu m$. З огляду на це, можливе оброблення деталей різної просторової конфігурації, наприклад: різальний інструмент (фрези, мітчики, різальні пластини, свердла і т.д.), лопатки газотурбінних двигунів, медичні інструменти та вироби, деталі механізмів обчислювальної техніки, матриць і пуансонів штампів та пресформ. Для різального інструменту, процес МАО забезпечує не тільки полірування робочих частин інструменту, а ще і зміцнення поверхневого шару матеріалу, утворення необхідних радіусів заокруглення різальних кромek. Однак, відносна новизна методу та його специфіка створює проблеми в його застосуванні, оскільки процеси і явища що можуть виникати при МАО ще недостатньо дослідженні. Це прямо впливає на широке застосування методу у виробництві. Тому необхідно детально досліджувати явища що виникають при обробленні. Одним з таких явищ є силова взаємодія між деталлю та порошком. Визначивши величину сил та їх специфіку при обробленні необхідних матеріалів та деталей дозволять прискорити виробництво, знизити собівартість та шанси виходу обладнання з ладу. Опис ідеї коротко показаний в табл. 4.1.

Таблиця. 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Рекомендації для оброблення	Загальне машинобудування	1) Зниження витрат на виробництво
	Інструментальне виробництво	2) Зменшення вірогідності виходу обладнання з ладу
	Медичні вироби	3) Зменшення машинного часу під час оброблення

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В табл. 4.2 наведено технології за допомогою яких можна реалізувати ідею проекту. Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових [20]:

- Технологія за якою буде реалізовано ідею
- Чи існують ці технології?
- Чи вони доступні для цього проекту?

Таблиця 4.2 – Технології здійснення проекту

Ідея проекту	Технологія реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Реалізація визначення силової взаємодії при МАО в умовах великих зазорів.	1. Аналітичне визначення згідно з існуючими табличними значеннями	Обмежена	Доступна. Має високу точність
	2. Експериментальні дослідження	Наявна	Доступна. Високі затрати часу
Обрана технологія експериментальних досліджень			

4.3 Аналіз ринкових можливостей стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів.

Визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 4.3) [20].

Таблиця 4.3 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Забезпечення ефективного виробництва	1) Машинобудування	Обсяги виробництва Надійність виробництва	-Забезпечення продуктивності оброблення -Зменшення собівартості
2.	Зменшення кількості обладнання, та виробів що вийшли з ладу	1) Машинобудування 2) Виробництво медичного обладнання	Надійність виробництва	-Забезпечення продуктивності оброблення -Виключення браку

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 4.4 – 4.5). Фактори подано в порядку зменшення значущості [20].

Таблиця 4.4 – Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція
1	Використання МАО	Підприємство задовольняється старими схемами і методами оброблення	Пояснення вигоди методу
2	Обладнання	Підприємство задовольняється існуючою інформацією про МАО	Демонстрація вигоди використання рекомендованих технологічних режимів
3	Нові дослідження	Виникнення нових факторів і перешкод для МАО	Подальші, більш детальні дослідження

Таблиця 4.5 – Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція
1	Поширення використання МАО	Збільшення використання МАО, приведе до збільшення попиту на інформацію про метод	Забезпечити подальші дослідження в цьому напрямку
2	Відкриття нових явищ при МАО	Дозволить розширити використання методу	Забезпечити подальші дослідження в цьому напрямку

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) [20] (табл. 4.6).

Таблиця 4.6 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ul style="list-style-type: none"> - Новизна - Якість - Універсальність - Простота 	<ul style="list-style-type: none"> - Залежність від використання МАО на ринку - Затрати часу
Можливості	Загрози
<ul style="list-style-type: none"> - Можливість використання на будь-якому виробництві - Виявлення нових явищ - Зростання використання МАО 	<ul style="list-style-type: none"> - Поява альтернативи - Зниження попиту на МАО

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Визначення стратегії охоплення ринку проводимо через вибір цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.7).

Таблиця 4.7 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів прийняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Загальне машинобудування	Готове прийняти продукт	Споживачі можуть мати потребу	Інтенсивна конкуренція	Має потенціал
2	Інструментальне виробництво	Готове прийняти продукт	Споживачі мають потребу	Інтенсивна конкуренція	Має потенціал
3	Виробництво медичного обладнання	Готове прийняти продукт	Інформація необхідна споживачам	Інтенсивна конкуренція	Має потенціал
Як цільові групи обрано весь ринок оскільки така інформація необхідна всім споживачам що використовують МАО.					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів, обираємо стратегію ринку. Оскільки, як цільову групу обрано весь ринок, використовуємо стратегію масового маркетингу.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку [20] (табл. 4.8).

Таблиця 4.8 – Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкуренто-спроможні пропозиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Покращення подальших досліджень через застосування нових технологій	Поступове зайняття домінуючої позиції на ринку.	Спрямованість на конкретні вимоги споживача	Стратегія диференціації

З огляду на розвиток через використання новітніх технологій та задоволення конкретних вимог споживача обираємо стратегію диференціації. Стратегія диференціації вигідна через ряд чинників:

- по відношенню до прямих конкурентів диференціація знижує ступінь замінності товару, посилює прихильність марці, зменшує чутливість до ціни і тим самим підвищує рентабельність;
- прихильність клієнтів послабляє їх тиск на фірму і перешкоджає приходу на ринок нових конкурентів;
- підвищена рентабельність збільшує стійкість до можливого зростання витрат в результаті дій сильного постачальника;
- відмітні властивості товару і завойована прихильність клієнтів захищають фірму і від товарів-замінників [20].

Далі обираємо стратегію конкурентної поведінки (табл. 4.9).

Таблиця 4.9 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які	Стратегія конкурентної поведінки
1	Технологія першопроходець	Пошук нових клієнтів	Використання нових методик і напрацювань	Стратегія зайняття конкурентної ніші

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (див. табл. 4.3), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 4.8) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.9) розробляється стратегія позиціонування (табл. 4.10). що полягає у формуванні ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект [20].

Таблиця 1.10 – Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкуренто-спроможні позиції власного стартапу	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію проекту
1	Продуктивність, зменшення браку	Стратегія диференціації	Спрямованість на клієнта, нові технологічні рішення	Продуктивно, заощадливо, Достовірно

Як результат обираємо стратегію диференціації що передбачає спрямованість на роботу зі споживачем, що робить продукт відмінним від продуктів конкурентів.

При розробці проекту було встановлено:

1. Попит на проект на ринку є постійно зростаючим

2. Проект є перспективним оскільки потенційні користувачі це будь-які машинобудівні виробництва що виконують фінішне оброблення.
3. Проект є конкурентоспроможним, оскільки цей напрямок досліджень мало відомий.
4. Розвиток проекту є доцільним оскільки метод МАО продовжує розвиватися.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті проведення експериментальних досліджень було встановлено, що:

1. На силову взаємодію під час магнітно-абразивного оброблення впливає ряд факторів магнітного, механічного, електричного, інерційного походжень. При обробленні в умовах великих магнітних зазорів ключову роль відіграє механічна взаємодія між МАІ та деталлю.

2. В роботі зроблено висновки, що найбільш впливовими властивостями магнітно-абразивного порошку та матеріалу оброблюваної деталі, які суттєво впливають на характер та силову взаємодію при обробленні є магнітні і триботехнічні властивості.

3. Показано, що при обробленні феромагнітної сталі оскольчастим порошком високі показники ефективного моменту (на рівні 1 – 1,2 Нм) спостерігаються при спаданні швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни (100 – 150 об/хв) та зростанні швидкості обертання навколо власної осі (60 – 80 рад/с). При обробленні округлим порошком – при зростанні обох факторів.

4. При обробленні парамагнітних матеріалів оскольчастим порошком високі показники ефективного моменту спостерігаються при спаданні швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни (на рівні від 100 до 150 об/хв) та зростанні швидкості обертання навколо власної осі (60 – 80 рад/с). При обробленні мілкозернистим або округлим порошком вплив швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни на ефективний момент несуттєвий.

5. Зміна магнітної індукції в умовах великих магнітних зазорів не спричиняє суттєвих змін ефективного моменту.

6. В роботі отримано рекомендації для оброблення матеріалів: сталь 40Х13, бронза БраЖ, сплави алюмінію Д-16 та титану ВТ-8 (Додаток А).

Список використаної літератури:

1. Акулович Л. М. Основы магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, В. Я. Лебедев. – Минск: БГАТУ, 2012. – 316 с.
2. Акулович Л. М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля/ Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2013. – 372 с.
3. Акулович Л.М. Расчет магнитной индукции в рабочем зазоре при магнитно-абразивной обработке [Текст]/ Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, В.Я. Лебедев, В.Е. Бабич, И.Н. Комик // Весник Полоцкого Государственного Университета (2009) 146 – 151.
4. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1986. – 176 с.
5. Ворошуха О.М. Технология магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей с управляемой ориентацией ферроабразивных зерен и регенерацией абразивной щетки импульсным магнитным полем: дис. канд. тех. наук : 05.02.08/ Ворошуха О.М. – Минск, 2019.
6. Давидюк А. І. Силові характеристики в магнітно-абразивному інструменті в робочій зоні кільцевого типу: магістерська дис. :133 Галузеве машинобудування / Давидюк А. І. – Київ, 2018. - 104с.
7. Джулій Д.Ю. Формування магнітно-абразивного інструменту при магнітно-абразивному обробленні довгомірних деталей у кільцевій робочій зоні [Текст]/ Д.Ю. Джулій, В.С. Майборода, І.В. Ткачук, В.М. Гейчук // Процеси механічної обробки в машинобудуванні випуск 11 (2011). 92 – 106.
8. Заставський К.О. Особливості взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею в умовах кільцевої ванни/ К.О. Заставський, В.С. Майборода. Збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної

обробки, верстати та інструмент», 6–9 листопада 2019 року.– Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2019. – 211 с.

9. Заставський К.О. Визначення динамічних навантажень при МАО в робочій зоні кільцевого типу в умовах великих магнітних зазорів/ К. О. Заставський, В. С. Майборода, І. В. Слободянюк. Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню» 2019.

10. Майборода В.С. Вплив змашувально-охолоджуючих технологічних середовищ (ЗОТС) на тріботехнічні властивості порошкового магнітноабразивного інструменту / В.С. Майборода, В.М. Гейчук, О.А. Івановський // Технологія і техніка друкарства: зб. наук. праць. К.: ВПІ НТУУ "КПІ". – 2004. Вип. 4(6). – С. 56 – 67.

11. Майборода В.С. Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту, сформованого із сумішей порошків [Текст] // Процеси механічної обробки в машинобудуванні випуск 6 (2009). 141 – 153.

12. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка специальных деталей: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08 / Майборода Виктор Станиславович. – Киев, 1988. – 170 с.

13. Майборода В.С. Методи підвищення роботоздатності різального інструменту [Текст]: навчальний посібник для студ. напряму підготовки 6.050503 «Машинобудування» / В.С. Майборода, Д.Ю. Джулій, І.В. Слободянюк / – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 183 с.

14. Майборода В.С. Методи поверхневого фінішного оброблення твердосплавного різального інструменту [Текст]/ В.С. Майборода, Н.В. Мініцька, Д.Ю. Джулій // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» 2011.

15. Майборода В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь : дис. докт. техн. наук: 05.03.01 / Майборода В. С. – Київ, 2001. – 404 с.

16. Майборода, В. С. Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы [Электронный ресурс]: монография / В. С. Майборода, И. В. Слободянюк, Д. Ю. Джулий ; М-во образования и науки Украины, Нац. техн. ун-т Украины “Киев. политехн. ин-т им. И. Сикорского”. – Электронные текстовые данные (1 файл: 10,75 Мбайт). – Житомир : Рута, 2017. – 272 с. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27484>

17. Олиker В.Е. порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий. М.: Металлургия, 1990. 176 с.

18. Пат. 104328 Україна В24 В31/112 (2006.01) МПК. Спосіб магнітно-абразивного оброблення / Майборода В.С., Гейчук В.М., Джулій Д.Ю., Ткачук І.В.; заявник та патентовласник Київський політехнічний інститут. № 101a201201745; заявл. 16.02.2012; опубл. 27.01.2014; бюл. № 2/2014.

19. Полищук В.С. Магнитно-абразивная обработка – высокоэффективный метод в машиностроении [Текст] / Физика и техника высоких давлений 2003, том 13, № 1 (2003) 127 – 137.

20. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

21. Сакулевич Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки/ Ф.Ю. Сакулевич – Мн.: Наука и техника, 1981. – 328 с.

22. Смолинець О.Р. Дослідження впливу швидкостей магнітно-абразивного оброблення на корисний момент на шпинделі при обробленні зразків з різного матеріалу/ О.Р. Смолинець, В.С. Майборода, Д.Ю. Джулій, Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню» 2017.

23. Тамм И.Е. Основы теории электричества: Учеб. Пособие для вузов. – 11-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 616 с.

24. Ткачук І. В. Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зазорах кільцевого типу : дис. канд. техн. наук : 05.03.01 / Ткачук І. В. – Київ, 2015. – 164 с.
25. Хомич Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий: монография / Н.С. Хомич. – Мн.:БНТУ, 2006. – 218.
26. Хомич Н.С. Моделирование кинематики процесса Магнитно-абразивного полирования кремниевых пластин [Текст]/ Н. С. Хомич, А.Ю. Луговик, Р.В. Федорцев, А.Е. Корзун, П.В. Кухто// Вестник БНТУ, (2009) 32 – 38.
27. Bin HU Study on Preparation Technology and Finishing Performance of Magnetic Abrasive Grain [Текст] / Bin HU, Yaping LU // Advanced Materials Research Vols. 452-453 (2012) 637 – 641.
28. Kheelan B. Magnetic Abrasive Finishing of AISI52100 [Текст]/ Kheelan B. Patel, K. M. Patel// International Journal of Trend in Research and Development Volume 1 (2014) 1 – 8.
29. P. Kalaa Experimental Study On Finishing Forces In Double Disk MagneticAbrasive Finishing Process While Finishing Paramagnetic Workpiece [Текст]/ P. Kalaa, P. M. Pandeyb// Elseveier Procedia Materials Science (2014) 1677 – 1684.
30. T.C. Kanish Investigations on the finishing forces in Magnetic Field Assisted Abrasive Finishing of SS316L [Текст] / Kanish T C, Narayanan S, Kuppan P, Denis Ashok S // Elseveier Procedia Engineering 174 (2017) 611 – 620.
31. V.C. Shuklaa, Modeling of normal force and finishing torque considering shearing and ploughing effects in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process with sintered magnetic abrasive powder [Текст]/ Vipin C. Shuklaa, Pulak M. Pandeya, Uday S. Dixitb, Anish Royc, Vadim Silberschmidt// Elseveier Wear 390–391 (2017) 11–22.
32. V.K. Jain, Experimental study and empirical modelling of magnetic abrasive finishing on ferromagnetic and non-ferromagnetic materials [Текст]/ V.K.

Jain, V. Kumar, M. Ravi Sankar// Int. J. Precision Technology, Vol. 3, No. 1 (2012)
91 – 104.

Додаток А

Рекомендації щодо оброблення матеріалів

Матеріал	Марка та зернистість Порошку	Швидкість обертання навколо осі кільцевої ванни, об/хв	Швидкість обертання деталі навколо власної осі, рад/с	Магнітна індукція, Тл
Д-16	Полімам-Т 400/315	100 – 150	40 – 80	0,17 – 0,24
	Полімам-Т 200/100	100 – 150	30 – 70	0,17 – 0,24
	Полімам-М 400/315	150	60 – 90	0,24
ВТ-8	Полімам-Т 400/315	100 – 150	70 – 90	0,17 – 0,24
	Полімам-Т 200/100	250 – 300	40 – 80	0,24
	Полімам-М 400/315	150 – 250	70 – 100	0,24
БраЖ	Полімам-Т 400/315	100 – 150	60 – 80	0,17 – 0,24
	Полімам-Т 200/100	100 – 150	30 – 80	0,17 – 0,24
	Полімам-М 400/315	250	60 – 90	0,24
Сталь 40Х13	Полімам-Т 400/315	100 – 150	60 – 80	0,24
	Полімам-Т 200/100	100 – 150	60 – 80	0,17
	Полімам-М 400/315	100 – 300	60 – 80	0,24

Додаток Б

Матеріали доповідей на конференціях

ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ПРИ МАО В РОБОЧІЙ ЗОНІ КІЛЬЦЕВОГО ТИПУ В УМОВАХ ВЕЛИКИХ МАГНІТНИХ ЗАРОЗІВ

Магнітно-абразивне оброблення це один з методів фінішного оброблення деталей складної форми. У сучасному виробництві дуже важливо максимально ефективно використовувати наявні ресурси, зокрема електроенергію та час. Знання процесів і зусиль, що виникають при магнітно-абразивній обробці дозволяє керувати продуктивністю. Проте особливості даного методу обробки ускладнюють визначення сил [1 – 3].

При МАО в умовах великих магнітних зазорів в кільцевих ваннах ефективність процесу різання визначається притисканням абразивних зерен до оброблюваної поверхні, рівномірним розподілом відносних рухів елементів МАІ та оброблюваних поверхонь деталей, а також здатністю МАІ до відновлення форми в процесі роботи [4]. Одним з найважливіших параметрів, від якого залежить ефективність оброблення є динамічний чинник. Тому, актуальним є дослідження нормальних сил, що виникають в процесі оброблення і створюються за рахунок «динамічного» навантаження без врахування сил, що виникають при додатковому обертанні зразків навколо власної осі. На оброблювану деталь і на зерна МАІ діє комплекс сил що мають механічне, магнітне та електричне походження. З огляду на складність визначення кожної складової окремо, в дослідженні було знайдено результуючу силу що діє на деталь. На схемі (рис. 1) зображено складові сил.

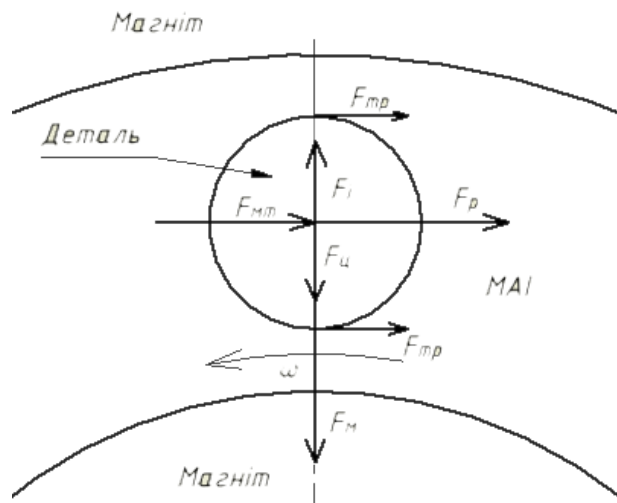


Рис. 1 Схема сил що діють на деталь при обробленні

Результуюча сила F_p – це сума векторів сил що діють на деталь, а саме: магнітної сили F_m , сили інерції F_i , центробіжної сили F_c , сили механічного тиску F_{mt} та сили тертя F_{tr} .

У роботі наведено методику, яка дозволяє визначити зусилля що виникають при магнітно-абразивній обробці феромагнітних і примагнітних

матеріалів. Для формування магнітно-абразивного інструменту МАІ було використано порошки осколкової форми Феромап з зернистостью 200/100 мкм та 400/315 мкм. Матеріали що оброблялись: БрАЖ, титановий сплав ВТ-8 – парамагнітні, сталь 40Х13 - феромагнітна.

Для дослідження силових характеристик МАІ в робочій зоні кільцевого типу було розроблено спеціальне пристосування з тензодатчиком, який працює на згин, отримані дані зчитувалися за допомогою АЦП та передавалися на ЕОМ.

Дослідження проводилось в кільцевій ванні з використанням МАІ, змінювались значення швидкості обертання та магнітної індукції. Циліндричні зразки діаметром 16 мм та довжиною 30 мм закріплювались на оправці з тензодатчиком в положенні паралельному до осі обертання робочої частини верстата. Дослідження проводилось при швидкостях обертання шпинделя $V=100, 200, 300$ об/хв, при кожному значенні швидкості змінювались значення магнітної індукції в діапазоні 0,17 - 0,24 Тл. Було розглянуто оброблення як без застосування відновлювального стержневого елементу (ВСЕ), так і разом з ним. Результати досліджень представлено у вигляді гістограм (рис. 2 – 4).

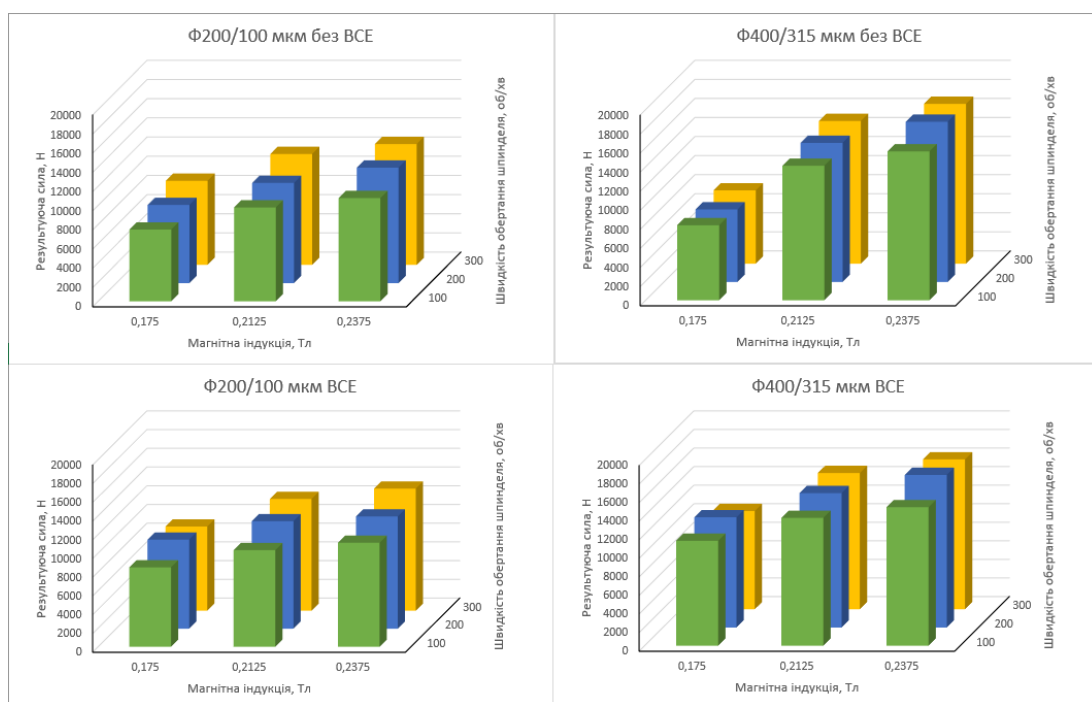


Рис. 2 Зміна результуючої сили F_p при обробленні сплаву ВТ-8 в залежності від зміни швидкості обертання шпинделя та магнітної індукції

Показано (рис. 2), що при обробленні титанового сплаву ВТ-8, результуюча сила зростає при зростанні магнітної індукції, швидкості обертання шпинделя верстата і при збільшенні розміру зерен МАІ. Використання ВСЕ приводить до збільшення сили, але не суттєво.

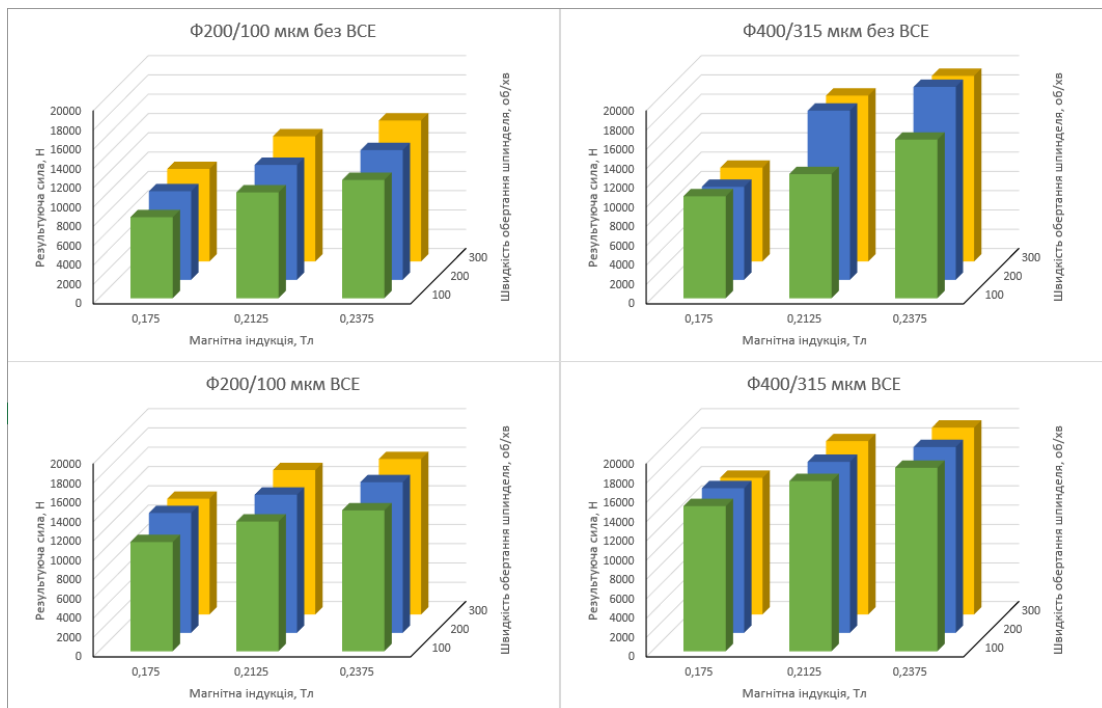


Рис. 3 Зміна результуючої сили F_p при обробленні бронзи БрАЖ в залежності від зміни швидкості обертання шпинделя та магнітної індукції

При обробленні бронзи БрАЖ існують такі самі закономірності як і при обробленні титану. Використання ВСЕ збільшує результуючу силу. Поясненням зменшеної сили при обробленні без ВСЕ, може бути витискання МАІ немагнітною заготовкою з робочої зони [4, 5]. У свою чергу ВСЕ дозволяє запобігти цьому явищу.

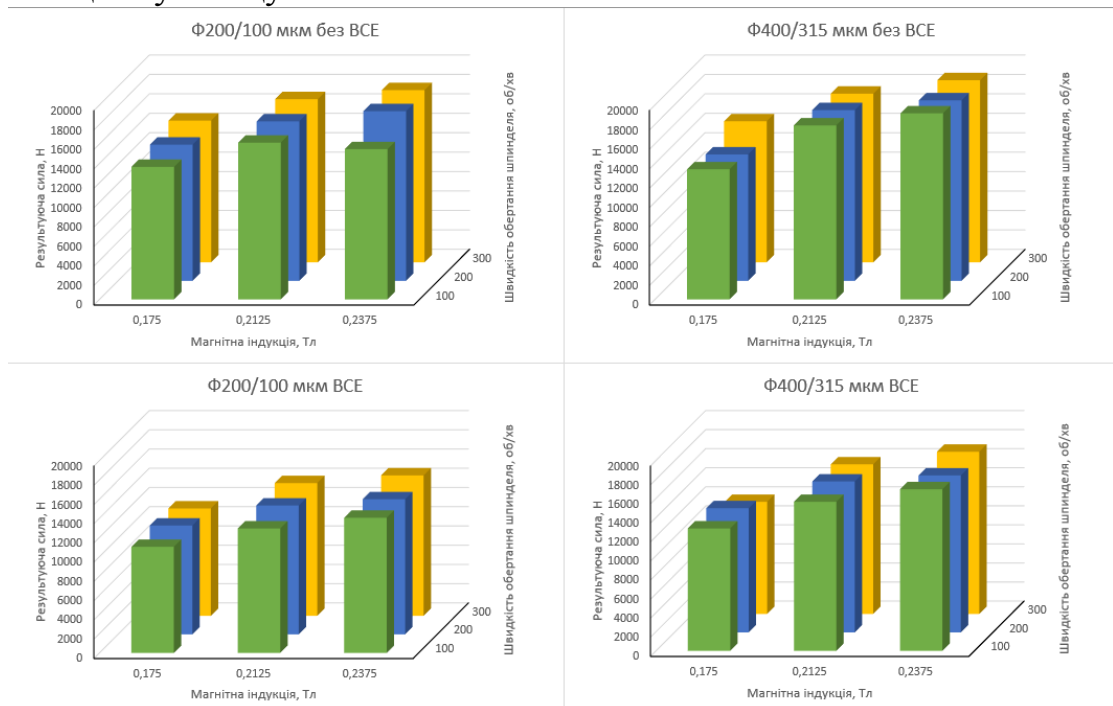


Рис. 4 Зміна результуючої сили F_p при обробленні сталі 40X13 в залежності від зміни швидкості обертання шпинделя та магнітної індукції

При обробленні сталі з використанням ВСЕ результуюча сила зменшилась, це може бути пов'язано з феромагнітними властивостями сталі. А саме з ущільненням порошку МАІ на полюсах магніту та заготовці [1] та його розрідженням при використанні ВСЕ.

Варто зазначити, що у всіх представлених дослідах зміна магнітного поля має більший вплив на результуючу силу ніж зміна швидкості.

Висновки:

- Зростання навантажень під час оброблення прямо пропорційне зростанню швидкості та магнітної індукції. При чому зміна індукції має більший вплив ніж швидкість.
- Використання відновлювального елемента для парамагнітних матеріалів збільшує навантаження під час оброблення, а для феромагнітних навпаки зменшує.
- Збільшення розміру зерен МАІ збільшує сили різання.

Список використаних джерел:

1. Ю.М. Барон Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1986. – 176 с.
2. Л. М. Акулович Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля/ Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2013. – 372 с.
3. T.C. Kanish Investigations on the finishing forces in Magnetic Field Assisted Abrasive Finishing of SS316L [Текст] / Kanish T C, Narayanan S, Kuppan P, Denis Ashok S // Procedia Engineering 174 (2017) 611 – 620
4. В.С. Майборода Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы/ В.С. Майборода, И.В. Слободянюк, Д.Ю. Джулий. – Житомир.: ПП «Рута», 2017. – 272 с.
5. І. В. Ткачук Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зазорах кільцевого типу [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Ткачук Іванна Валентинівна ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". - Київ, 2015. - 25 с.

ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОДІЇ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ З ОБРОБЛЮВАНОЮ ПОВЕРХНЕЮ В УМОВАХ КІЛЬЦЕВОЇ ВАННИ.

Магнітно-абразивне оброблення (МАО) це один з перспективних методів фінішного оброблення деталей як простої, так і складної форми. Але активне впровадження методу МАО у виробництво стримується відсутністю достатньої кількості даних про особливості взаємодії магнітно-абразивного порошку, сформованого при МАО в магнітно-абразивний інструмент (МАІ), величину зусиль, які виникають в процесі оброблення і їх природу. Саме ця інформація дозволяє виконувати цілеспрямоване керування ефективністю процесу [1 – 2].

Експериментальні дослідження виконували на установці типу кільцева ванна [2] при швидкостях обертання робочої головки V , яка встановлена в шпиндель верстата в діапазоні 100-300 об/хв, магнітній індукції в робочих зонах коаксіальної магнітної системи 0,17 та 0,24 Тл, та швидкості обертання мінішпинделя з контрольним зразком, встановлених на корпусі робочої головки, яку змінювали від 100 до 1000 об/хв.. Процес МАО виконували в умовах формування стабільного МАІ [2]. Зміна швидкості обертання мінішпинделя забезпечувалась за рахунок зміни напруги U на двигуні постійного струму, який є індивідуальним приводом мінішпинделя в діапазоні від 3 до 15 В з кроком 1 В. Для дослідження використовувались циліндричні зразки діаметром 16 мм та довжиною 30 мм встановлені паралельно осі головки і магнітної кільцевої ванни, виготовлені з алюмінію, бронзи, титанового сплаву (парамагнітні матеріали) та сталі 40Х13 (ферромагнітна). При МАО зразки встановлювали таким чином, щоб відстань від їх поверхні до полюсних наконечників, які формують кільцеву ванну була однаковою.

Методика досліджень полягала в визначенні ефективного моменту - $M_{\text{еф}}$ через напругу U , силу струму I , та швидкість обертання деталі навколо своєї осі ω [3]. На першому етапі було визначено момент холостого ходу за формулою (1):

$$M_{\text{х.х.}} = \frac{U_{\text{хх}} \cdot I_{\text{хх}} - I_{\text{хх}}^2 \cdot r_{\text{дв.}}}{\omega} \quad (1),$$

де $M_{\text{хх}}$ – момент холостого ходу, $U_{\text{хх}}$ – напруга холостого ходу (В), $I_{\text{хх}}$ – сила струму холостого ходу (А), $r_{\text{дв.}}$ – опір двигуна (Ом), ω – швидкість обертання зразка (об/хв). За формулою (2) розраховували безпосередній момент на двигуні при обробленні деталей.

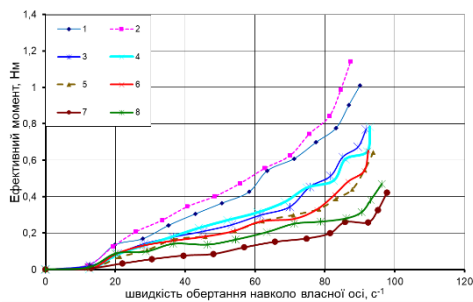
$$M_{\text{дв.}} = \frac{U_{\text{роб.}} \cdot I_{\text{роб.}} - I_{\text{роб.}}^2 \cdot r_{\text{дв.}}}{\omega} \quad (2),$$

де $M_{\text{дв.}}$ – робочий момент, $U_{\text{роб.}}$ – робоча напруга, $I_{\text{роб.}}$ – робоча сила струму. Ефективний момент - $M_{\text{еф}}$ визначали як

$$M_{\text{еф}} = M_{\text{дв.}} - M_{\text{хх}} \quad (3).$$

Зусилля, що виникають при МАО залежать від особливостей взаємодії оброблюваної деталі з МАІ. При цьому важливим параметром є магнітні властивості оброблюваного матеріалу. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що при МАО сталевих – ферромагнітних зразків має місце майже лінійне зростання величини $M_{\text{еф}}$ до частоти обертання мінішпинделя з зразком 60-70 с⁻¹. Збільшення частоти обертання призводить до активного зростання ефективного моменту, який характеризує умови взаємодії в парі МАІ-оброблювана поверхня. Показано, що при обробленні ферромагнітної сталі спостерігається зниження величини $M_{\text{еф}}$ при збільшенні швидкості обертання навколо осі ванни (рис. 1). Це може бути пов'язано зі зменшенням площі активного контакту МАІ з оброблюваними поверхнями. Процес зростання величини $M_{\text{еф}}$ при частотах обертання мінішпинделя більших за 60-70 с⁻¹ відбувається за рахунок зміни механізму взаємодії частинок МАІ з поверхнею деталей, який пов'язаний з зміною кутів різання і активним повертанням частинок в безпосередній близькості до оброблюваних поверхонь. Встановлено, що зі збільшенням величини магнітної індукції присутнє незначне збільшення ефективного моменту. Зазначені закономірності мають місце при використанні порошоків різної зернистості.

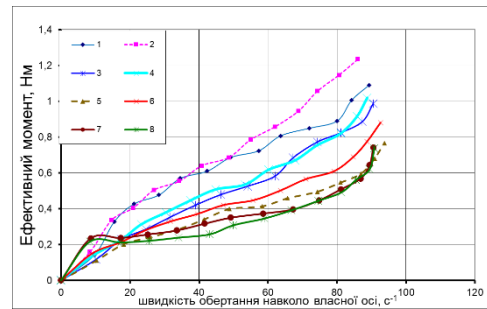
Для парамагнітних матеріалів, таких як титан (рис. 2), алюміній (рис. 3) та бронза (рис. 4), при обробці порошком зернистістю 400/315 мкм спостерігаються такі самі залежності як і для сталі. А саме, зменшення $M_{\text{еф}}$ при збільшенні швидкості обертання навколо осі ванни, та незначний вплив зміни величини магнітної індукції. При обробленні парамагнітних матеріалів порошком зернистістю 200/100 мкм має місце аномальна зміна ефективного моменту при зміні швидкості обертання навколо осі ванни. Це може бути зумовлено дією пондеромоторних сил, а саме формуванням локальних мікрополів між окремими зернами порошку що збільшують або зменшують загальну величину магнітного поля в робочій зоні [2]. Для всіх парамагнітних матеріалів при збільшенні швидкості обертання деталі навколо власної осі більше 80 с⁻¹ спостерігається різке підвищення величини $M_{\text{еф}}$. Це відбувається за рахунок переорієнтації частинок і мікрооб'ємів МАІ в зоні контакту з оброблюваною поверхнею, тобто зміна положення зерна відносно поверхні деталі та зміна величини площини реального контакту частинок з поверхнею. Такого різкого зростання моменту при обробленні сталевих деталей не спостерігається, оскільки сили магнітної взаємодії між порошком і деталлю перевищують сили, які приймають участь при формуванні МАІ не дозволяючи зернам активно переорієнтовуватися.



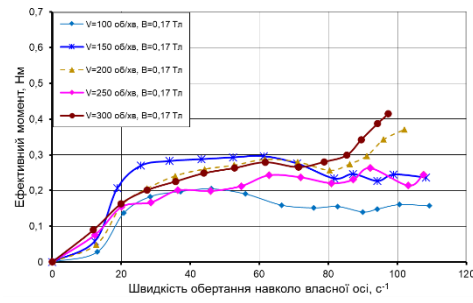
Поліам Т 200/100 мкм

1-V=100 об/хв, B=0,17 Тл; 2-V=100 об/хв, B=0,24 Тл; 3-V=150 об/хв, B=0,17 Тл; 4-V=150 об/хв, B=0,24 Тл; 5-V=200 об/хв, B=0,17 Тл; 6-V=200 об/хв, B=0,24 Тл; 7-V=300 об/хв, B=0,17 Тл; 8-V=300 об/хв, B=0,24 Тл

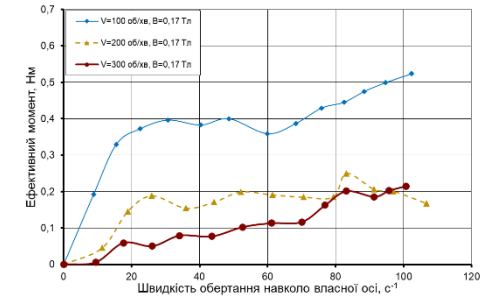
Рис. 1 Залежність ефективного моменту від швидкості обертання зразків зі сталі навколо власної осі



Поліам Т 400/315 мкм

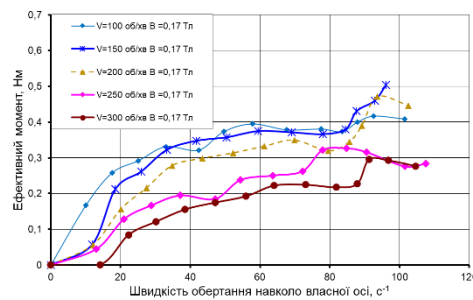


Поліам Т 200/100 мкм

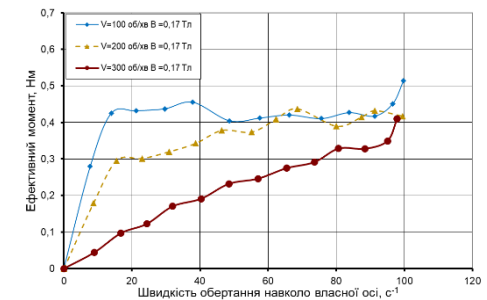


Поліам Т 400/315 мкм

Рис. 2 Залежність ефективного моменту від швидкості обертання зразків з титану навколо власної осі

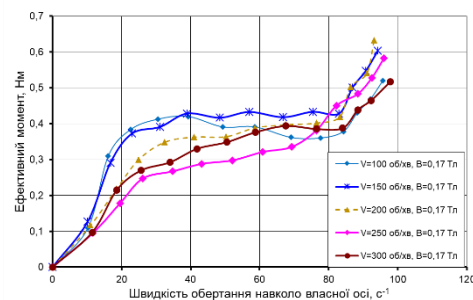


Поліам Т 200/100 мкм

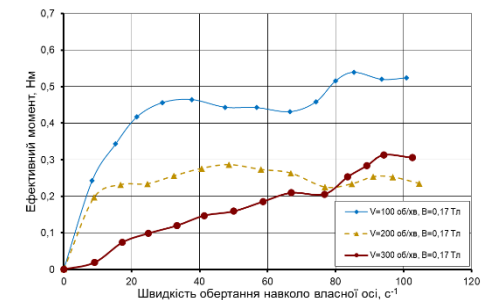


Поліам Т 400/315 мкм

Рис.3 Залежність ефективного моменту від швидкості обертання зразків з алюмінію навколо власної осі



Поліам Т 200/100 мкм



Поліам Т 400/315 мкм

Рис. 4 Залежність ефективного моменту від швидкості обертання зразків з бронзи навколо власної осі

Список використаних джерел:

1. Ю.М. Барон Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1986. – 176 с.
2. Майборода, В. С. Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы [Электронный ресурс]: монография / В. С. Майборода, И. В. Слободянюк, Д. Ю. Джулий ; М-во образования и науки Украины, Нац. техн. ун-т Украины “Киев. политехн. ин-т им. И. Сикорского”. – Электронные текстовые данные (1 файл: 10,75 Мбайт). – Житомир : Рута, 2017. – 272 с. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27484>
3. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка специальных деталей: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08/Майборода Виктор Станиславович. – Киев, 1988. – 170 с.

УДК 621.9

І.В. Слободянюк, К.О. Заставський, В.С. Майборода

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Визначення динамічних навантажень при МАО в робочій зоні кільцевого типу в умовах великих магнітних зазорів

Магнітно-абразивне оброблення це один з методів фінішного оброблення деталей складної форми. У сучасному виробництві дуже важливо максимально ефективно використовувати наявні ресурси, зокрема електроенергію та час. Знання процесів і зусиль, що виникають при магнітно-абразивному обробленні дозволяє керувати продуктивністю. Даний метод можливо широко застосовувати у різних галузях промисловості, для оброблення різнопрофільних деталей виготовлених з різних матеріалів. Аналіз науково-технічної літератури показав, що для оброблення магнітно-абразивним методом деталей складної геометричної форми, до яких відноситься осьовий та кінцевий різальний інструмент, багатогранні твердосплавні пластини, лопатки газотурбінних двигунів та ін., доцільно виконувати на установках з кільцевим розташуванням робочої зони [1-6]. Дослідження [4-6] впливу магнітно-абразивного оброблення (МАО) в умовах великих магнітних зон на показники якості різального інструменту показують, що за рахунок формування магнітно-абразивного інструменту (МАІ) зі стабільними властивостями можливо досягнути зниження шорсткості робочих поверхонь в 1,5-2 рази, підвищення поверхневої твердості на 10-15%, формувати радіуси округлення в діапазоні 10-25 мкм з повним видаленням з поверхонь мікрозадирок, заусенок та розполіруванням мікрОВИРИВІВ. Проте для контрольованого впливу на деталь недостатньо інформації про фізичні процеси, які відбуваються в робочій зоні при контакті МАІ з оброблюваними поверхнями, що являється важливою особливістю даного методу [1-3].

При МАО в умовах великих магнітних зазорів з кільцевим розташуванням робочої зони ефективність процесу різання визначається притисканням абразивних зерен до оброблюваної поверхні, рівномірним розподілом відносних рухів елементів МАІ та оброблюваних поверхонь деталей, а також здатністю МАІ до відновлення форми в процесі роботи [4]. Одним з найважливіших параметрів, від якого залежить ефективність

© І.В. Слободянюк, К.О. Заставський, В.С. Майборода, 2019

оброблення є динамічний чинник. Тому, актуальним є дослідження нормальних сил, що виникають в процесі МАО і створюються за рахунок «динамічного» навантаження без врахування сил, що виникають при додатковому обертанні зразків навколо власної осі.

Сила, з якою МАІ діє на оброблювану поверхню деталі, є результуючою силою комплексу сил магнітного, електромагнітного і механічного походження, які діють на кожне окреме абразивне зерно, що знаходиться в робочій зоні верстату. Сили взаємодії фераабразивного середовища з оброблюваною поверхнею визначаються характером зовнішнього магнітного поля, електропровідними і магнітними властивостями матеріалу порошку та оброблюваної деталі, величиною робочої зони, схемою оброблення, фізико-механічними характеристиками порошкового середовища, формою і розмірами зерен, властивостями вживаних МОТС, швидкістю переміщення оброблюваного виробу навколо осі кільцевої ванни, траєкторією руху в робочій зоні [1, 4, 5].

З огляду на складність визначення кожної складової сили окремо, в дослідженні було знайдено результуючу силу опору МАІ на оброблювану поверхню деталі. На схемі (рис. 1) зображено узагальнені складові сил, що діють на оброблювану деталь в робочій зоні кільцевого типу.

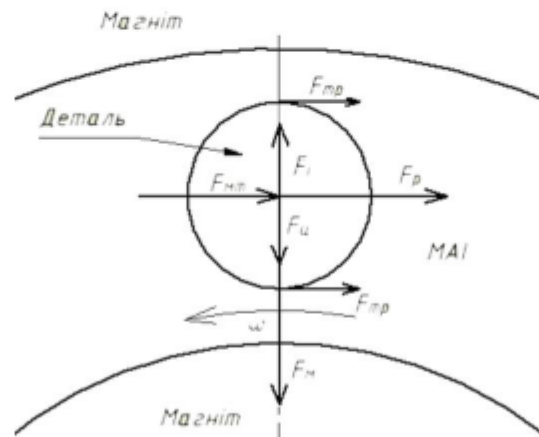


Рис. 1. Розподіл сил при МАО деталей в робочій зоні кільцевого типу

Результуюча сила F_p – це сума векторів сил, які діють на деталь, а саме: магнітної сили F_m , сили інерції F_i , центробіжної сили F_{cp} , сили механічного

тиску $F_{\text{мт}}$ та сили тертя $F_{\text{тр}}$. Розроблену методику, яка дозволяє визначити зусилля, що виникають при МАО в робочій зоні кільцевого типу модельних зразків виготовлених з феромагнітних та парамагнітних матеріалів. Для безпосереднього контролю силових характеристик, які виникають між поверхнею оброблюваних зразків та МАІ в робочій зоні кільцевого типу розроблено спеціальне пристосування з тензодатчиком, який працює на згин. Дане пристосування складається з верхнього перехідника, що закріплюється у шпинделі верстату та базується по чотирьох отворах, тензодатчика, на якому наклеєні тензорезистори, верхнього перехідника та оправки для закріплення дослідних зразків. Отриманий з тензодатчика сигнал зчитується за допомогою АЦП та передається на ЕОМ [8].

Модельні зразки циліндричної форми діаметром 16 мм та довжиною 30 мм закріплювались на оправці в пристосуванні з тензодатчиком в перпендикулярному положенні до площини робочої зони верстату (ширина – 35 мм, висота – 30 мм), таким чином щоб відстань між полюсними наконечниками та оброблюваною поверхнею була однаковою. Зразки виготовляли з бронзи БрАЖ та титанового сплаву ВТ-8, які відносяться до парамагнітних матеріалів та феромагнітної сталі 40Х13.

Для формування МАІ використовували порошки осколкової форми Феромап з зернистістю 200/100 мкм та 400/315 мкм, оскільки даний тип порошку отримано методом розпилення з розплавів і є універсальним [5, 7]. Для забезпечення рівномірного, контрольованого і продуктивного оброблення по висоті робочої зони використовували відновлювальний стержневий елемент (ВСЕ) у вигляді контртіла для формуванню заданих стабільних властивостей МАІ, за рахунок примусового переміщення витісненого порошку в зони активного оброблення – в міжполюсний простір [4, 5].

При дослідженні змінювали значення швидкості переміщення зразків вздовж кільцевої робочої зони 1, 2 та 3 м/с та величину магнітної індукції в діапазоні 0,17 - 0,24 Тл.

Величина результуючої сили опору МАІ на оброблювану поверхню F_p з урахуванням швидкості руху модельних зразків та величини магнітної індукції, отримана зі спеціального пристосування та опрацьована в середовищі Excel представлена у вигляді гістограм на рис. 2 – 4.

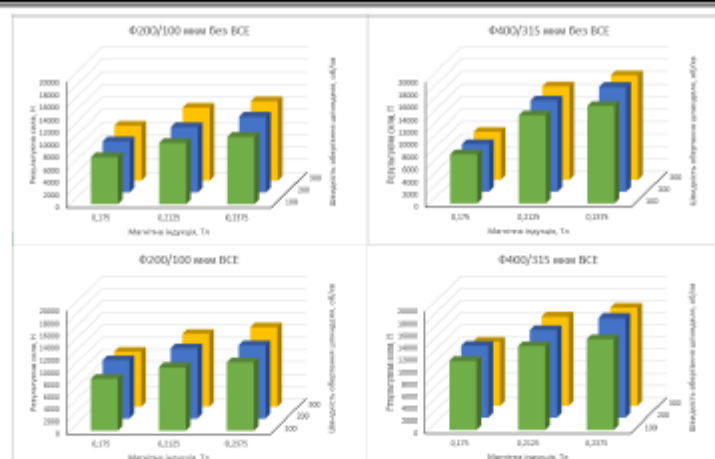


Рис. 2 Зміна результуючої сили F_p при обробленні сплаву ВТ-8 в залежності від зміни швидкості обертання шпинделя та магнітної індукції

На рис. 2 показано, що при обробленні титанового сплаву ВТ-8, результуюча сила зростає при зростанні величини магнітної індукції та збільшенні швидкості переміщення зразків вздовж робочої зони. Збільшення фракції абразивного порошку приводить до незначного збільшення сил опору МАІ руху зразка в зоні оброблення. Використання ВСЕ приводить до рівномірного розподілу F_p по висоті робочої зони.

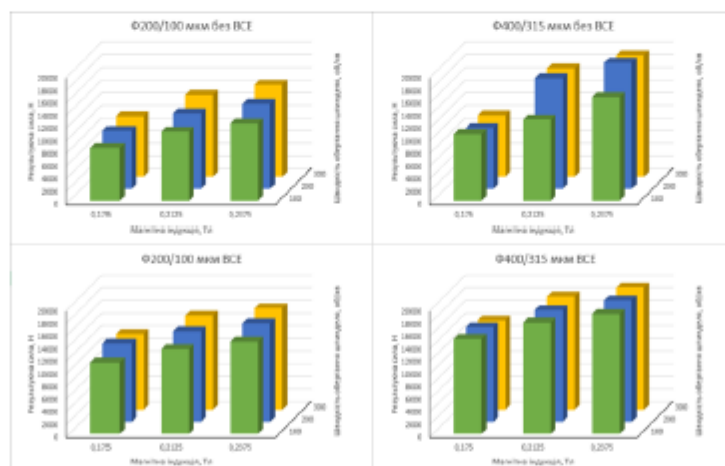


Рис. 3 Зміна результуючої сили F_p при обробленні бронзи БрАЖ в залежності від зміни швидкості обертання шпинделя та магнітної індукції

При обробленні зразків з БрАЖ (рис. 3) мають місце аналогічні закономірності, як і при обробленні сплаву ВТ-8, оскільки дані матеріали мають подібні магнітні властивості. Використання ВСЕ збільшує величину результуючої сили опору оскільки збільшується щільність МАІ в робочій зоні. Зменшення сили F_p при МАО зразків без ВСЕ, пов'язано з частковим витісненням МАІ за межі робочої зони [4, 5].

Аналіз результатів (рис. 4), отриманих при обробленні зразків зі сталі 40Х13 з використанням ВСЕ показав, що результуюча сила зменшилась, це може бути пов'язано з феромагнітними властивостями сталі, а саме з перерозподілом порошкового МАІ в зоні оброблення та його розрідженням при використанні ВСЕ.

Варто зазначити, що для всіх виконаних досліджень встановлено, що зміна величини магнітного поля забезпечує більший вплив на результуючу силу опору МАІ на оброблювану поверхню зразків ніж зміна швидкості переміщення деталей в здовж кільцевої робочої зони.

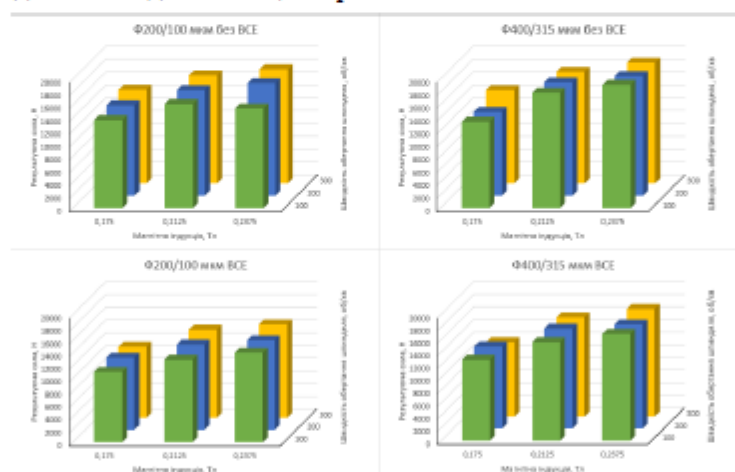


Рис. 4 Зміна результуючої сили F_p при обробленні сталі 40Х13 в залежності від зміни швидкості обертання шпинделя та магнітної індукції

Висновки:

1. Зростання результуючої сили опору МАІ на рух модельних зразків під час МАО прямо пропорційне зростанню швидкості переміщення вздовж кільцевої робочої зони та величині магнітної індукції. При чому зміна величин магнітної індукції забезпечує більший вплив ніж швидкість.

2. Використання ВСЕ для формування рівномірного МАІ по висоті робочої зони при МАО зразків з парамагнітних матеріалів збільшує навантаження на оброблювальну поверхню, а для феромагнітних навпаки зменшує.

3. Збільшення розміру абразивних зерен при формуванні МАІ збільшує величину сили результуюча сила F_p .

Отримані дані потребують подальшого опрацювання і можуть бути використанні при конструюванні обладнання для МАО в робочій зоні кільцевого типу деталей різної геометричної форми з різних матеріалів

Список використаних джерел:

1. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.
2. Акулович Л. М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск: БГАТУ, 2013. – 372 с.
3. Investigations on the finishing forces in magnetic field assisted abrasive finishing of SS316L / T. C.Kanish, S. Narayanan, P. Kuppan, S. Denis Ashok. // Procedia Engineering. – 2017. – №174. – pp. 611–620 (doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.196)
4. Майборода В. С. Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы / В. С. Майборода, И. В. Слободянюк, Д. Ю. Джулий. – Житомир: ПП «Рута», 2017. – 272 с. – (<http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27484>).
5. Ткачук І. В. Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зазорах кільцевого типу : дис. канд. техн. наук : 05.03.01 / Ткачук І. В. – Київ, 2015. – 164 с.
6. Джулій Д.Ю. Підвищення якості багатограних непереточуваних твердосплавних пластин при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні : дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Джулій Д.Ю. – Київ, 2014. – 175 с.
7. Олиker В.Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / В.Е. Олиker. – М.: Металлургия, 1990. – 176 с.
8. Давидюк, А. І. Силіові характеристики в магнітно-абразивному інструменті в робочій зоні кільцевого типу : магістерська дис. : 133 Галузеве машинобудування / Давидюк А. І. – Київ, 2018. – 104 с.